

Zur Neuverfugung an der St. Johannis Kirche in Ellrich

Berichte zur Denkmalpflege-Forschung

**Dipl.-Ing. A. Rinne
Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy**

März 1995

**Gefördert durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie
Vorhaben BAU 7025 B**

30-0411/001

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ

IBMB

AMTLICHE MATERIALPRÜFANSTALT FÜR DAS BAUWESEN

TU BRAUNSCHWEIG

Zur Neuverfugung an der St. Johannis Kirche in Ellrich

Berichte zur Denkmalpflege-Forschung

Dipl.-Ing. A. Rinne

Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig

März 1995

Gefördert durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie
Vorhaben BAU 7025 B

INHALTSVERZEICHNIS

1	Problemstellung	1
1.1	Einleitung	1
1.2	Pilotobjekt St. Johannis Kirche	3
1.2.1	Baugeschichte	3
1.2.2	Zustand der Fugen	4
1.3	Dauerhaftigkeit von Fugenmörtel	8
1.4	Verbundmodell	10
2	Vorgehen	11
2.1	Versuchsprogramm	11
2.2	Prüftechnik	13
2.2.1	Vorversuche und Bewitterungsprüfkörper	13
2.2.2	Prüfverfahren	18
2.3	Mörtelmodifizierung	20
3	Ergebnisse	23
3.1	Eigenschaften des Dolomitsteins	23
3.1.1	Chemisch-mineralogische Eigenschaften	23
3.1.2	Physikalisch-mechanische Eigenschaften	25
3.2	Eigenschaften des Altmörtels	28
3.2.1	Zusammenfassung bisheriger Untersuchungen	28
3.2.2	Ergänzende Untersuchungen	30
3.3	Eigenschaften des Verfugmörtels	35
3.3.1	Chemisch-mineralogische Eigenschaften	37
3.3.2	Physikalisch-mechanische Eigenschaften	38
3.4	Verbunduntersuchungen	41
3.4.1	Versuchsprogramm	41
3.4.2	Serie 1	42
3.4.3	Serie 2 - Modifizierte Mörtel	45

4	Musterkonsolidierung	49
4.1	Auswahl der Musterfläche	49
4.2	Ablauf der Verfugung	51
4.3	Beurteilung der Verfugung	57
5	Schlußbetrachtung	59
6	Literatur	61
	Anhang	64

1 Problemstellung

1.1 Einleitung

Im Rahmen von Erhaltungsmaßnahmen an historischen Bauwerken aus Natursteinmauerwerk ist oftmals eine Sanierung der Fugen erforderlich. Der Verfugmörtel soll dem Lastabtrag und insbesondere dem Witterungsschutz für das Mauerwerk dienen. Diese Aufgabe kann nur dann erfüllt werden, wenn eine rißfreie Haftung des Verfugmörtels am Stein unter thermisch-hygrischen Witterungseinwirkungen gewährleistet werden kann. Die Qualität des Stein-Mörtel-Verbundes ist somit ein Maß für die Dauerhaftigkeit, die "Lebenserwartung" der Verfugung.

In den vergangenen Jahrzehnten wurden zahllose fehlerhafte Neuverfugungen an historischen Bauten durchgeführt: oft wurden Mörtelsysteme verwandt, die sich an anderen Objekten unter vollkommen anderen Bedingungen bewährt haben; auf das Anlegen von Musterflächen oder gar auf Verträglichkeitsuntersuchungen zwischen Altmaterial und Verfugmörtel wurde verzichtet. An den sanierten Objekten traten große Schäden wie insbesondere standfestigkeitsvermindernde Treibreaktionen auf, deren Sanierung wesentlich aufwendiger ist als der ursprüngliche Schaden. Man erkannte aus diesen Fehlern, daß zur fachgerechten und dauerhaften Sanierung auf eine Optimierung des zur Neuverfugung vorgesehenen Mörtels hinsichtlich der gegebenen baulichen Situation nicht verzichtet werden kann. Die Auswahl des richtigen Mörtels für die Instandsetzung von Natursteinmauerwerken muß stets objektspezifisch erfolgen und mit sorgfältigen Untersuchungen und Prüfungen einhergehen /1/.

Die BMFT-Forschung zur Denkmalpflege befaßt sich mit dieser objektspezifischen Mörtelanpassung. In Niedersachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt gibt es eine Vielzahl von historischen Natursteinbauten, die mit Gipsmörtel errichtet wurden. Das Objekt, mit dem sich die MPA Braunschweig befaßt, die St. Johannis Kirche, befindet sich in Ellrich im Südharz. Diese Gegend ist reich

an Anhydritvorkommen, die seit vielen Jahrhunderten für bauliche Zwecke genutzt werden /2/.

Bei der Neuverfugung oder der Hohlrauminjektion gipshaltigen Mauerwerks ist insbesondere auf die Verträglichkeit des Verfug-/Injektionsmörtels mit dem Gips zu achten. Die Verwendung eines normalen Portlandzementmörtels würde Treibreaktionen zwischen Gips und Portlandzement hervorrufen, die durch die Volumenvergrößerung des Treibproduktes Risse hervorrufen und den Mauerwerksverbund zerstören würden. Dieses Phänomen ist seit einigen Jahren bekannt und es gibt viele Hersteller, die sogenannte sulfatbeständige Mörtel anbieten.

Das Fraunhofer-Institut für Holzforschung (WKI) entwickelte einen faserbewehrten Mörtel, dessen Bindemittel speziell für die Sanierung von gipshaltigem Mauerwerk vorgesehen ist /3/, der darüberhinaus aber auch einen guten Haftverbund und eine hohe Dauerhaftigkeit des Mörtel/Naturstein-Verbundes erwarten läßt.

Dieser Mörtel wurde zahlreichen Eignungstest unterzogen. Zunächst fanden umfassende Untersuchungen zur Verträglichkeit zwischen Gipsmörteln und dem neu entwickelten Mörtel statt /4/. Daran knüpften systematische Versuchsreihen an der MPA Braunschweig /5/ zum Verbundverhalten zwischen verschiedenen Natursteinen und diesem Fasermörtel an. Diese Untersuchungen fanden zunächst ausschließlich im Normklima bei 20 °C und 65 % r.F. statt und gingen mit einigen Modifizierungen der Mörtelrezeptur einher. Mit diesen optimierten Rezepturen konnte eine Haftung zwischen Stein und Mörtel erzielt werden.

Um eine Aussage über die Dauerhaftigkeit des Mörtel-Stein-Verbundes machen zu können, mußten darüberhinaus Untersuchungen an Verbundkörpern unter langandauernder Bewitterung durchgeführt werden. Der Einfluß der Witterung im jahreszeitlichen und im täglichen Wechsel auf die Verbundqualität ist für die Lebenserwartung der Neuverfugung maßgebend. Derjenige Mörtel, der auch unter längerer Witterungseinwirkung den Verbund zum Dolomitstein

aufrecht erhält, wird anschließend an einer Musterfläche des Objekts eingesetzt. Auf diesem Wege wird die Applikationstechnik am Bauwerk erprobt und die Eignung des Mörtels verifiziert.

1.2 Pilotobjekt St. Johannis Kirche

1.2.1 Baugeschichte

Die St. Johannis Kirche stammt aus dem 13. Jahrhundert /6 bis 8/. Drei große Brände haben den heutigen Baukörper geprägt (Abb. 1.1). So stammen der Chor und die Sakristei aus dem Wiederaufbau des 17. Jahrhunderts, das Kirchenschiff und das Querschiff hingegen aus dem späten 19. Jahrhundert. Der dritte Brand um 1900 hatte den Turm so nachhaltig geschädigt, daß in den dreißiger Jahren seine Konsolidierung durch Zementinjektion und Vernadelung notwendig wurde.



Abb. 1.1: Die St. Johannis Kirche in Ellrich 1993

In allen Bauphasen wurden regionale Baustoffe genutzt. Das Natursteinmauerwerk besteht aus Dolomitstein, der mit Gipsmörtel vermauert wurde. Das Mauerwerksgefüge ist zweischalig, außen aus Werksteinen im regelmäßigen Schichtenverband, innenraumseitig aus Bruchsteinen im regellosen Verband. Der Gipsmörtel in der Bruchsteinschale wurde mit ungebranntem Gipsstein gemagert.

Diese Bauweise bedeutete eine hohe Schadensanfälligkeit. Die hohe Feuchtebelastung des Mauerwerks durch Löscharbeiten und mangelnde Bauunterhaltung, verstärkt durch Treibmineralbildung am injizierten Turmmauerwerk, haben den Gipsmörtel aufgeweicht und das Mauerwerksgefüge geschwächt. Wegen mangelnder Standsicherheit mußte der Turm 1960 abgebrochen werden.

1.2.2 Zustand der Fugen

Das Fugenbild im aufgehenden Mauerwerk der St. Johannis Kirche zeigt sich sehr heterogen. Es existieren große Teilflächen, in denen nur Preßfugen bis zu 1 cm Höhe bzw. Breite vorkommen (Abb. 1.2) und daneben andere, in denen die Fugen bis zu 3 cm breit sind (Abb. 1.3). Der überwiegende Teil des aufgehenden Mauerwerks setzt sich völlig ungeordnet aus Preßfugen und breiteren Fugen zusammen. Es sind vor allem die Stoßfugen, die breiter sind, die Lagerfugen hingegen sind eher als Preßfugen ausgeführt worden.

Der in den Fugen anzutreffende Mauermörtel ist im wesentlichen der bereits genannte Gipsmörtel, mit dem die Kirche ursprünglich und auch im Zuge der früheren Sanierungsarbeiten aufgebaut wurde. Daneben findet man zwei Verfugmörtel, die ganz offensichtlich jüngeren Datums sind, wahrscheinlich aus dem 20. Jahrhundert.

Alle Mörtel sind durch einen angegriffenen Zustand gekennzeichnet, wie man auf den Abbildungen 1.2 und 1.3 deutlich erkennen kann.



Abb. 1.2: Beispiel für Preßfugen, Giebel im nördl. Querhaus



Abb. 1.3: Beispiel für stärkere Fugen, Giebel im nördl. Querhaus

In den Stoßfugen sind sehr starke Flankenansrisse, die bis zu 5 mm Breite und mehrere cm Tiefe erreichen, anzutreffen. Dadurch wurde oftmals ein völliges Herauslösen des Mörtels hervorgerufen, sogenannte Hohlfugen sind entstanden. In den herausgewitterten Bereichen der Lagerfugen sind Abstandhalter zwischen den Steinen zu erkennen. Hierfür wurden Schieferplättchen und Gesteinsbruchstücke verwendet, siehe Abb. 1.4.

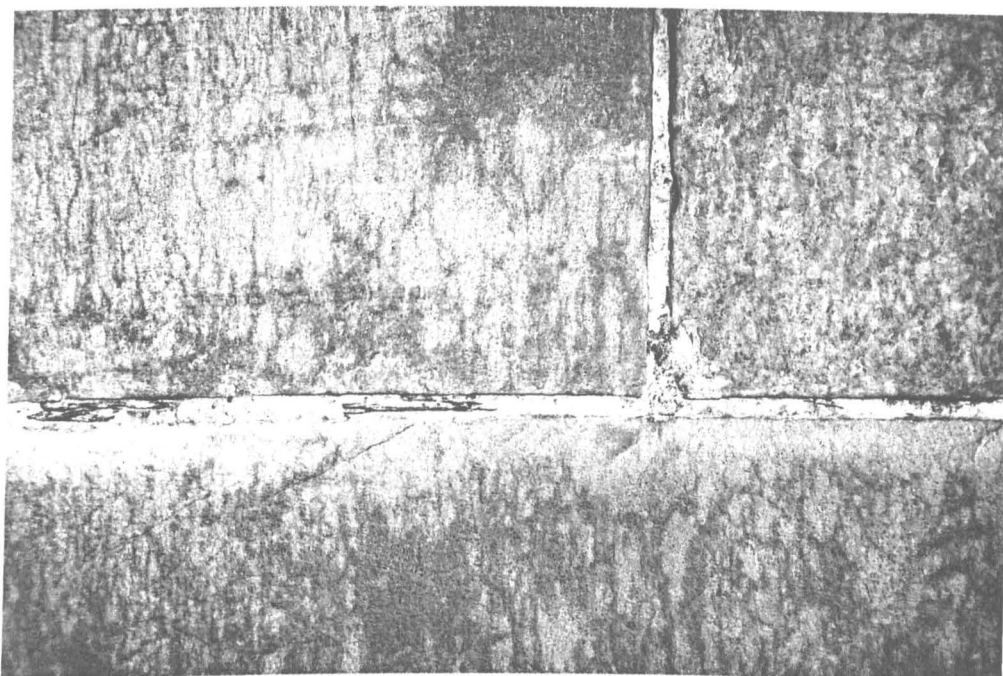


Abb. 1.4: Abstandhalter in den Lagerfugen

Flankenansrisse und fehlender Mörtel begünstigten den Feuchteeintrag in das tieferliegende Mauerwerk. Dieser Feuchteeintrag ist für Gips sehr ungünstig. Bei Feuchteaufnahme weicht Gipsmörtel auf, weil das Calciumsulfat zum Teil wasserlöslich ist. Der daraus resultierende Festigkeitsverlust ist nennenswert und bedenklich für einen Mauermörtel. Aus diesem Grund wird Gips heute auch nicht mehr als Außenbaustoff verwendet. Gipsmörtel erreicht nur im trockenen Zustand eine Biegefestigkeit von ca. $\beta_{Bz} = 2,5 \text{ N/mm}^2$ und eine Druckfestigkeit von $\sigma_D = 6,0 \text{ N/mm}^2$ /6/. Das Mauer-

werk der St. Johannis Kirche ist so stark durchfeuchtet, daß der Gipsmörtel auch in den nächsten Jahrzehnten noch stark feucht sein und somit seine mögliche Tragfähigkeit nicht erreichen wird.

Das Fugenbild an der St. Johannis Kirche erfordert in großen Teilbereichen dringend eine Neuverfugung. In Bereichen der Gründung und der Strebepfeiler ist in Zusammenhang mit konstruktiven Sicherungsmaßnahmen eine Neuverfugung notwendig (Abb. 1.5).



Abb. 1.5: Strebepfeiler am südlichen Langhaus

Das aufgehende Mauerwerk bedarf in Bereichen tiefer Flankenabrissse und starkem Herauslösen des Mörtels einer Fugensanierung. Darüberhinaus gibt es aber auch Fugen, die nicht neuverfugt

werden müssen. Dabei handelt es sich im wesentlichen um Preßfugenabschnitte.

1.3 Dauerhaftigkeit von Fugenmörtel

Die Dauerhaftigkeit einer Verfüzung läßt sich im wesentlichen durch drei Eigenschaftsanforderungen definieren: der chemisch-mineralogischen Verträglichkeit des Verfugmörtels mit im Mauerwerk vorhandenen Stoffen, dem Haftverbund zwischen Verfugmörtel und Naturstein sowie der Witterungsbeständigkeit des Verfugmörtels. Alle drei Anforderungen sind gleichrangig und können zu unterschiedlichen Mörtelsystemen führen.

Für das Pilotobjekt der St. Johanniskirche in Ellrich war die Auswahl möglicher Mörtelsysteme durch die Verträglichkeitsanforderung gegenüber dem Gipsmörtel eingeschränkt. Es wurde ein Mörtelbindemittel aus Hüttensand, Gips und Zement (HGZ) /3/ entwickelt, das diese Anforderung erfüllt. Der Erhärtungsmechanismus beruht auf der sulfatisch/basisch angeregten Hydratation des Hüttensands. Die Sulfatbeständigkeit ist in zahlreichen Untersuchungen und Ringversuchen bestätigt worden /9/. Das HGZ-Bindemittel ist jedoch nicht verträglich gegenüber Portlandzement. Ein Kontakt mit Zementinjektionen oder Zementmörteln muß deshalb vermieden werden. Solche Zementgebundenen Mörtel sind im aufgehenden Mauerwerk aber nicht oder kaum anzutreffen.

Für den Haftverbund zwischen Mörtel und Naturstein sind sowohl bestimmte Mörtелеigenschaften als auch Natursteineigenschaften maßgebend. Die entscheidenden Mörtелеigenschaften sind Haftzug- und Zugfestigkeit, Elastizitätsmodul und die hygrischen Verformungen. Haftzug- und Zugfestigkeit können durch eine Bewehrung des Mörtels verbessert werden. Eine Bewehrung mit Ligno-Cellulose-Fasern (LCF) bewirkt zusätzlich die willkommene Reduktion des Elastizitätsmoduls. Der Verbundwerkstoff erhält rißüberbrückende Eigenschaften. Die Faserzugabe führt jedoch auch zur Erhöhung des Wasseranspruchs und zu erhöhten hygrischen Verformungen.

Durch Zwangsmischung kann der Mörtel in einer knetbaren Konsistenz hergestellt werden, was insbesondere bei tiefreichender Verfugung vorteilhaft ist. Der Einfluß des Natursteins beruht im wesentlichen auf dessen Porenstruktur, d.h. auf dem Porenradius und dem Porenanteil. So beeinflussen die hygrischen Eigenschaften - Wasseraufnahme, Kapillaraktivität - des Natursteins den Haftverbund durch Wasserentzug aus dem Mörtel. Die Porengrößen des Natursteins können ausschlaggebend für einen guten Verbund sein: die Haftung zwischen einem sehr porösen Stein und einem Mörtel wird allein schon durch die mechanische Verzahnung begünstigt. Ein sehr dichter Stein dagegen bietet keinerlei Verzahnungsmöglichkeit.

Die Witterungsbeständigkeit muß sowohl für den Verbundwerkstoff gegeben sein als auch jeweils für die Bindemittelmatrix und die Faser. Der Feuchte- und Temperaturhaushalt des oberflächennahen Bauwerksbereichs wird durch die Wettergrößen bestimmt, die somit die Verbundqualität zwischen Naturstein und Fugenmörtel maßgeblich beeinflussen. Dieser Komplex aus Wettergrößen und Haftverbund ist Gegenstand des vorliegenden Berichts. Die Witterungsbeständigkeit des Mörtels wurde in zahlreichen Laborversuchen und durch mehrjährige natürliche Bewitterung bestätigt.

Die Beständigkeit der LCF in der Bindemittelmatrix wird durch die alkalische Pufferkapazität bestimmt. Eine Alkalikorrosion der LCF kann bei geeigneter Zusammensetzung des Bindemittels ausgeschlossen werden /10/. An mehrjährig ausgelagerten Probenwänden wurde zusätzlich die Gefahr der mikrobiologischen Zersetzung der LCF untersucht /11/. An der Oberfläche wurde Kontamination festgestellt, das Eindringen in größere Tiefen wird aber durch die hohe Dichte verhindert. Infolge der Absenkung des pH-Wertes auf 8-9 nach drei Jahren Auslagerung führt die Kontamination an der Oberfläche nicht zur Zersetzung der Cellulose. Eine weitere Verbesserung der mikrobiologischen Beständigkeit wurde durch Zusatz von Schwermetallsalzen erreicht.

1.4 Verbundmodell

Das Dauerhaftigkeitskriterium des Haftverbundes ist die Rißbildung in der Fuge. Rißbildung tritt ein, wenn die Einwirkungen S auf den Haftverbund größer sind als sein Widerstand R . Im bewitterten Mauerwerksausschnitt stellen sich im Stein und Mörtel entsprechend der Porenstruktur und der Witterungseinwirkung Feuchte- und Temperaturgradienten ein (Abb. 1.6).

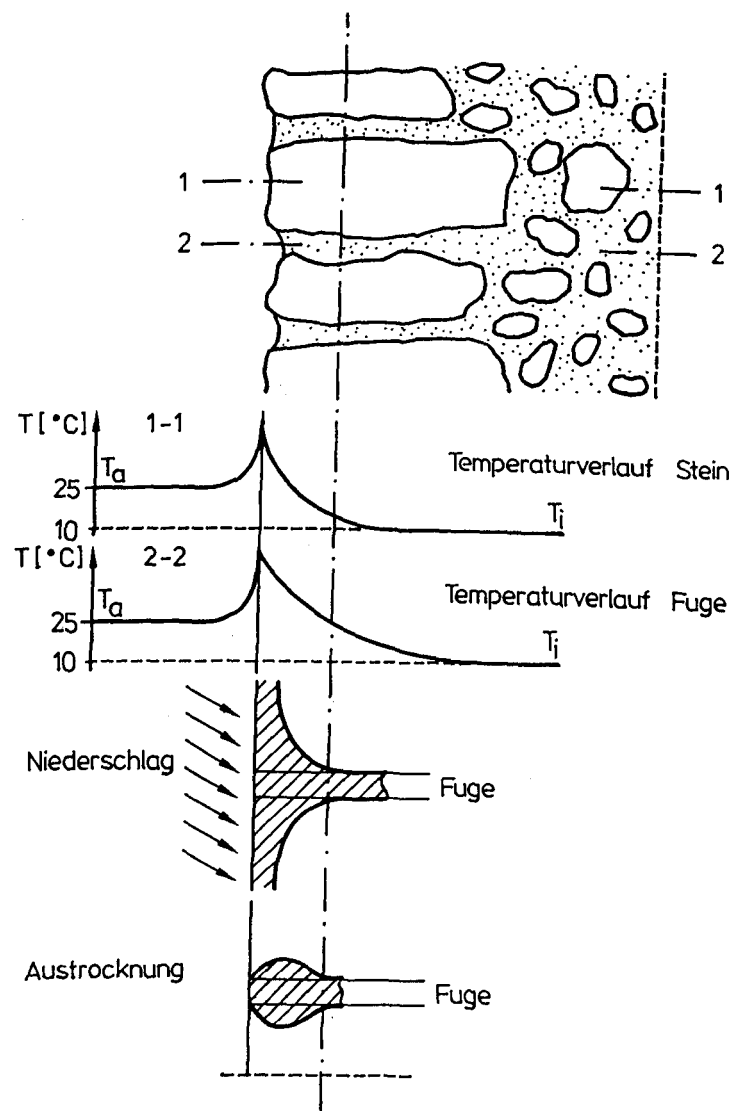


Abb. 1.6: Temperatur- und Feuchtegradient im Mauerwerk

Diese sind mit thermischen und hygrischen Verformungen $\epsilon_{\Delta T}$ bzw. $\epsilon_{\Delta F}$ des erhärtenden oder erhärteten Mörtels verbunden. Da Verformungen normal zur Fugenflanke durch die Steinflanken gezwängt

sind, entstehen Zwangsspannungen σ_{zw} normal zur Steinflanke. Längs der Fuge sind die Verformungen durch inneren Zwang behindert, und es entstehen Eigenspannungen σ_E . Die Größe der auf den Haftverbund einwirkenden Spannungen ist orts- und zeitabhängig und unterliegt der Spannungsrelaxation.

Der Widerstand R des Haftverbundes wird durch die Zugfestigkeit des Steins β_{zst} , die Zugfestigkeit des Mörtels $\beta_{zmö}$ und die Haftzugfestigkeit β_{hz} beschrieben. Die Größe mit dem geringsten Wert ist maßgebend. Alle Größen streuen beträchtlich. Da die Zugfestigkeitswerte vom Feuchtegehalt abhängig sind, ist der Widerstand R orts- und zeitabhängig:

$$R_{x,t} = \min (\beta_{hz}, \beta_{zst}, \beta_{zmö})$$

Wenn die Dauerhaftigkeit erschöpft ist ($R < S$), tritt Rißbildung ein. Zwangsspannungen führen zu Flankenabrissen, Eigenspannungen zu Querrissen im Mörtel.

2 Vorgehen

2.1 Versuchsprogramm

Ein Programm zur Untersuchung des Haftverbundes unter Bewitterung muß verschiedene Punkte berücksichtigen. Es muß die Frage nach der Bewitterungsart und -dauer geklärt werden. Welche Materialeigenschaften sind für die Verbundproblematik interessant, und schließlich welche Meßgrößen geben eine Auskunft über die Verbundqualität?

Als Bewitterungsart für die erste Prüfkörperserie wurden sowohl die künstliche Bewitterung in der Klimakammer, als auch die natürliche Bewitterung an zwei klimatisch verschiedenen Orten erprobt. Für die künstliche Bewitterung spricht, daß die klimatischen Bedingungen von außen steuerbar sind. Die Zahl der Kli-

maeinflüsse kann auf wenige Größen reduziert werden, um so die Auswirkung einer bestimmten Größe ohne die Beeinflussung anderer zu erkennen. Bei den vorliegenden Untersuchungen wurden in der Klimakammer konstant 20 °C und zyklisch 85 bzw. 35 % r.F. eingestellt. Zusätzlich wurde zweimal Niederschlag simuliert. Darüberhinaus läßt sich das Klimaprogramm auch als Zeitraffer gestalten, so daß die Gesamtdauer der Bewitterung im Vergleich zur natürlichen Bewitterung stark verkürzt werden kann. Bei der Auslagerung im Freien wirken die natürlichen Wetterzyklen auf den Prüfkörper ein. Tages- und Jahresgang der Wettergrößen sind kompliziert und in der Klimakammer nur durch erheblichen Aufwand zu realisieren. Nicht zuletzt sprechen die niedrigeren Kosten für die natürliche Bewitterung. Als Auslagerungsort wurde das Gelände der MPA in Braunschweig und eine Freifläche des Klosters in Walkenried im Südharz ausgewählt. Für die zweite Prüfkörperserie wurde die Südseite der St. Johannis Kirche in Ellrich gewählt. Das Klima in der Braunschweiger Gegend gilt als typisch für den mitteldeutschen Raum, der Südharz dagegen zeichnet sich durch höhere Niederschläge und tiefere Temperaturen aus.

Als Verfugmörtel wurden im Verlaufe von Optimierungsmaßnahmen drei Varianten des gipsverträglichen Fasermörtels und ein marktgängiger Sanierputz in das Versuchsprogramm aufgenommen:

HGZ

HGJ

HGQ

Sanierputz Re

Alle drei Fasermörtel beruhen auf dem Bindemittelsystem Hütten-sand - Gips - Zement. Variiert wurde die dritte Komponente: der Zement. So handelt es sich bei der Zementkomponente des HGZ um PZ 45 F HS und bei den beiden Varianten HGJ und HGQ um zwei Quellzementtypen, siehe dazu Tabelle 3.4. Auf der Grundlage dieser Zusammensetzung wurden die Fasermörtel mit Zusatzmitteln versehen, die z.B. die Verarbeitbarkeit oder den Wasser-Bindemittel-Wert beeinflussen. Der "Sanierputz Re" ist nach Herstel-

lerangaben ebenfalls gipsverträglich und ist sowohl für Putz- als auch für Verfugarbeiten geeignet. Die Ergebnisse der erforderlichen Mörteluntersuchungen sind im Kapitel 3.3 dargestellt.

Über den Verlauf der Bewitterungszeit hinweg wurden die für die Verbundqualität wichtigsten thermischen und hygrischen Klimadaten aufgezeichnet. Das waren Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Sonnenenergie, Niederschlag und Schlagregen. Vergleichsweise unbedeutend ist der Einfluß von Luftströmungen. Am Bewitterungsprüfkörper selbst, insbesondere an der Fuge, werden die Steintemperatur und das Dehnen und Schwinden gemessen. Darüberhinaus wird in regelmäßigen Abständen ein Rißbild aufgenommen.

2.2 Prüftechnik

Zunächst sind die den Verbund beeinflussenden Eigenschaften des Dolomitsteins, des Gipsaltmörtels und des für die Sanierung vorgesehen Mörtels zu ermitteln. Anschließend wird das Verbundverhalten zwischen Mörtel und Naturstein geprüft. Die dabei zum Einsatz kommende Prüftechnik wurde bereits an anderer Stelle /12/ ausführlich vorgestellt und soll deshalb hier nur kurz umrissen werden.

2.2.1 Vorversuche und Bewitterungsprüfkörper

Als Vorversuch werden einfache Verbundkörper (Abb. 2.1) aus je zwei Dolomitwürfeln mit einer Kantenlänge von 10 cm und einer zwischen ihnen angelegten 2 cm starken Fuge aus dem Fasermörtel hergestellt. An diesen sogenannten "Zwei-Stein-Körpern" wird die Verbundqualität anhand der Haftzugfestigkeit zwischen Mörtel und Stein beurteilt. Bis zum Prüftermin verbleiben die Zwei-Stein-Körper in der Form im Klima 20°C/65 % r.F.. Hinsichtlich Herstellung und Handhabung ist dieses Verfahren einfach, so daß Optimierungsmaßnahmen am Mörtel an diesen Prüfkörpern gut zu überprüfen sind.

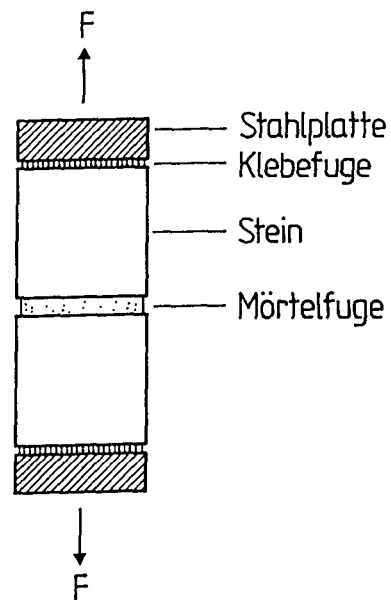


Abb. 2.1: Zwei-Stein-Körper, schematisch

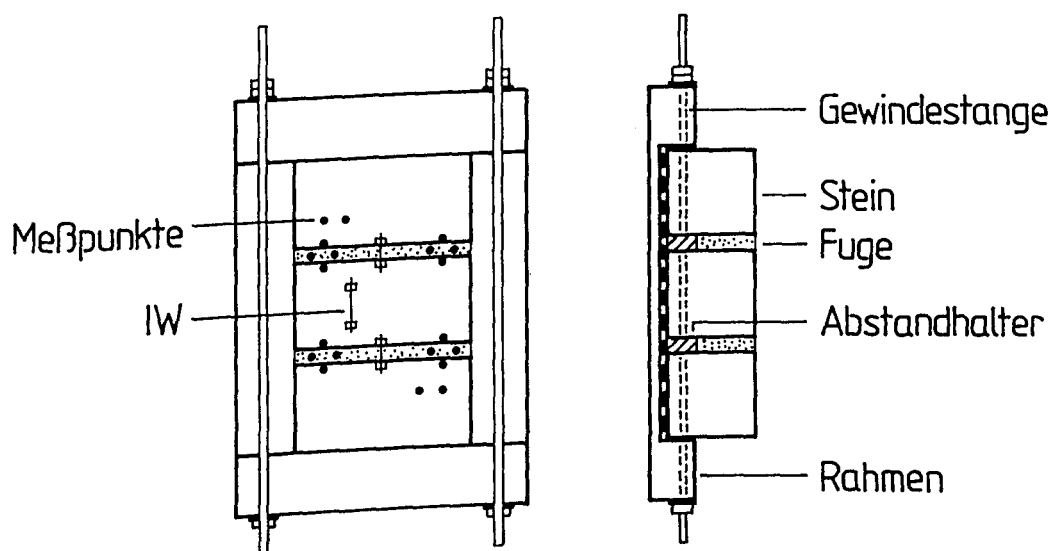


Abb. 2.2: Drei-Stein-Körper, schematisch

Der nächste Schritt der Erprobung sollte eine Aussage zur Dauerhaftigkeit einer Neuverfugung mit dem betreffenden Fugenmörtel

liefern. Zu diesem Zweck wurden sogenannte "Drei-Stein-Körper" (Abb. 2.2) hergestellt, die die Situation im Mauerwerk modellieren: die Steinquader haben hier jeweils die Maße $15 \times 15 \times 30 \text{ cm}^3$ und werden mit Hilfe eines Stahlrahmens und Abstandhaltern so fixiert, daß zwei Fugen von je 2 cm Höhe entstehen. Anschließend wird ein Drehmoment von 30 Nm auf die Zugstangen aufgebracht, um die Zwängung im Mauerwerk nachzustellen.

Der Fasermörtel muß mit einem Zwangsmischer hergestellt werden /10/, da er wegen der Faserzugabe eine steife, knetbare Konsistenz aufweisen muß. Das Einstopfen des Mörtels in die Fugen erfolgte zunächst noch händisch mit Stopfhammer und Fugenholz, wird heute aber durch einen Preßluft betriebenen Bildhauerhammers abgelöst. Es schließt sich eine vierzehntägige Nachbehandlungsphase mit feuchten Tüchern und Folien an, um das Verdunsten von Feuchtigkeit in der wichtigsten Hydratationsphase zu reduzieren (Abb. 2.3). Danach werden die Drei-Stein-Körper seitlich versiegelt und mit Setzdehnungsmeßstrecken und induktiven Wegaufnehmern ausgestattet, um die Verformungen von Stein und Mörtel infolge der Witterungseinflüsse erfassen zu können (Abb. 2.4). Schließlich werden Schutzbleche seitlich und oben angebracht, um den Eintrag von Niederschlag zu vermeiden (Abb. 2.5).



Abb. 2.3: Nachbehandlung der Verbundkörper

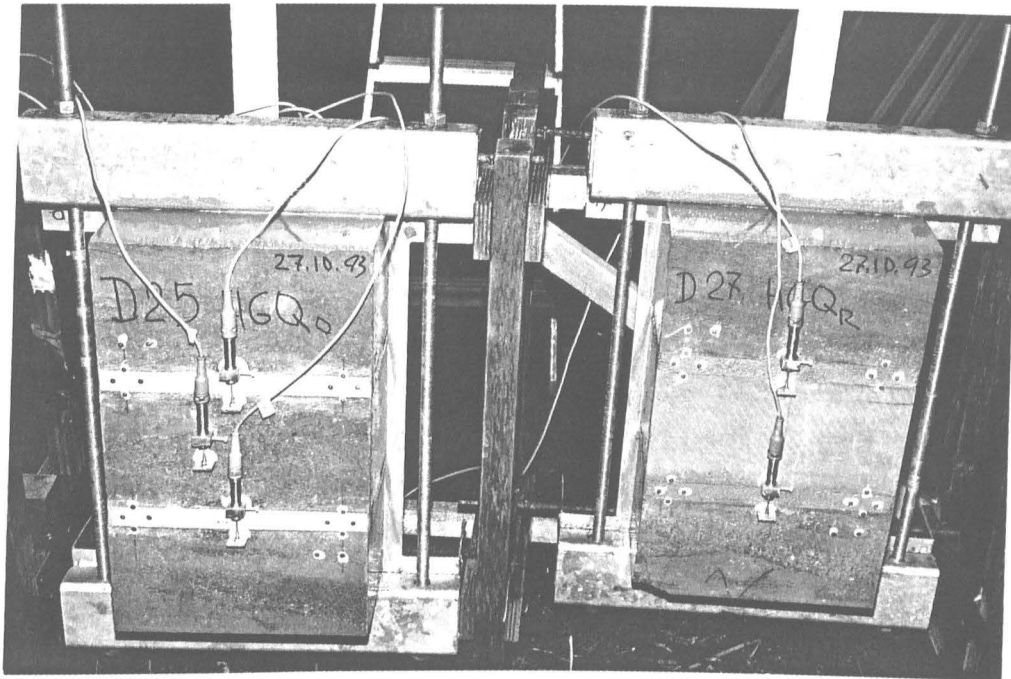


Abb. 2.4: Versiegeln und Instrumentieren

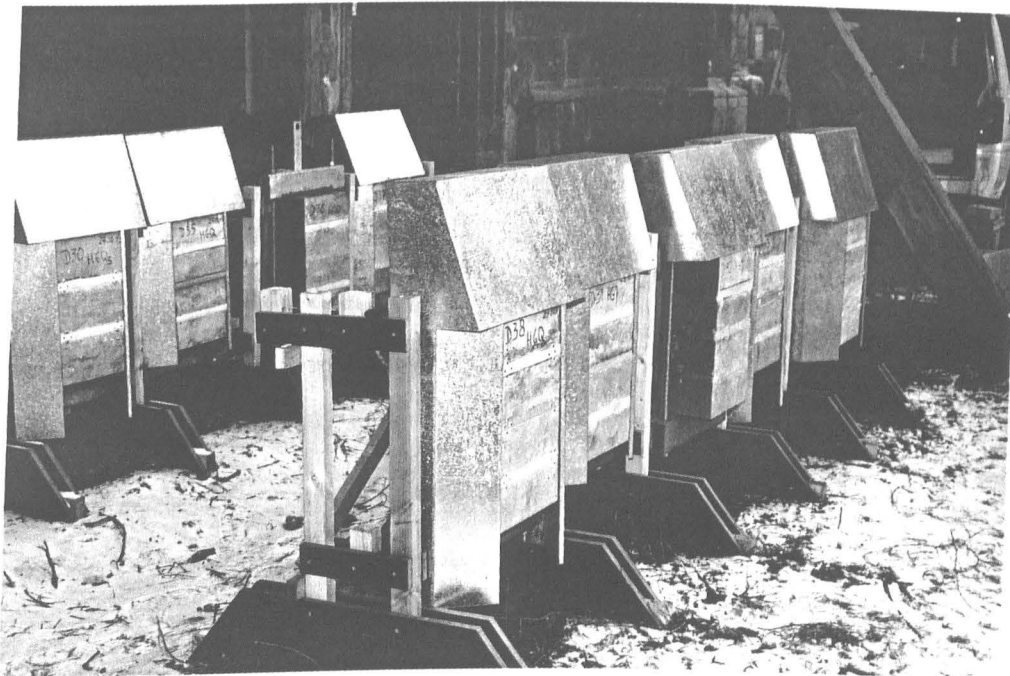


Abb. 2.5: Abgedeckte Drei-Stein-Körper

Es werden verschiedenartige Meßstrecken instrumentiert: senkrecht über die Fuge, horizontal auf der Fuge, sowie senkrecht und horizontal auf dem Stein. Damit Zusammenhänge zwischen Klimaeinflüssen und der Entwicklung der Verbundqualität erkannt werden können, werden unter Freibewitterung Meßgeräte zur Erfassung der Luftfeuchtigkeit, der Lufttemperatur, der Sonnenenergie, der Niederschlagsmenge und des Schlagregens instrumentiert. Bei den Versuchen in der Klimakammer werden die Luftfeuchtigkeit und die Lufttemperatur gemessen. Abb. 2.6 zeigt exemplarisch die aus jeweils 2 bzw. 4 Setzdehnungsmeßstrecken gemittelten Verformungen eines Prüfkörpers in der Klimakammer. Die Luftfeuchtigkeit verlief im wöchentlichen Wechsel zwischen 85 und 35 % r.F. bei konstant 20 °C.

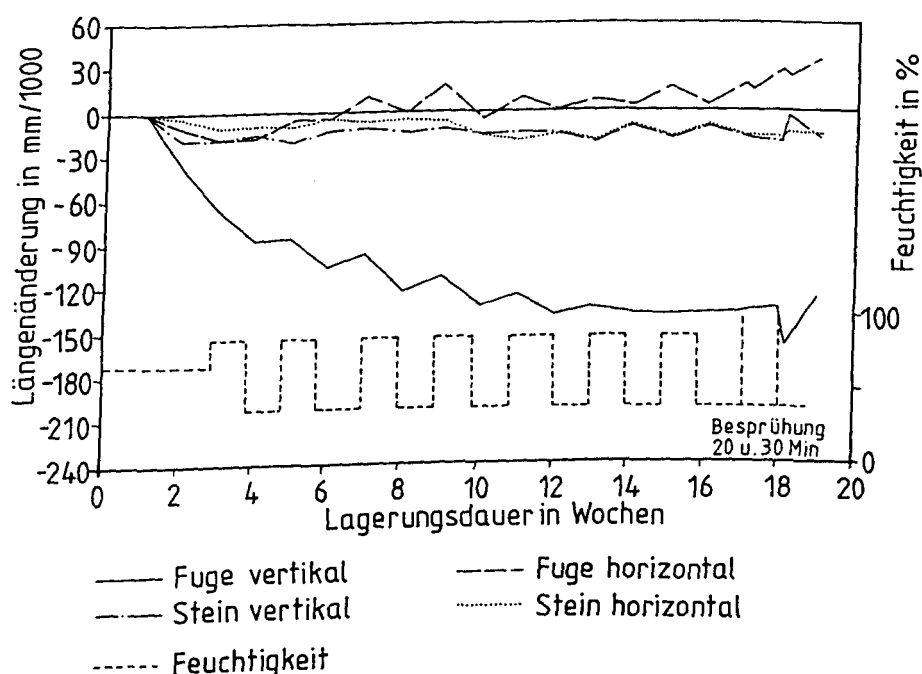


Abb. 2.6: Verformungskurve eines Prüfkörpers

Anschließend werden die präparierten Körper bis zum Prüftermin meßtechnisch überwacht. Zusätzlich zur Verformungsmessung wird die Qualität des Verbundes mit der Rißlupe und der Fühlerlehre beurteilt. So können Risse und deren Tiefe und Öffnungsbreite erkannt und protokolliert werden.

2.2.2 Prüfverfahren

Nach Ablauf des Bewitterungszeitraums wird der Drei-Stein-Körper verschiedenen, aufeinanderfolgenden Prüfmethoden unterzogen. Das Schema in Abb. 2.7 stellt diese Prüfmethoden anschaulich dar.

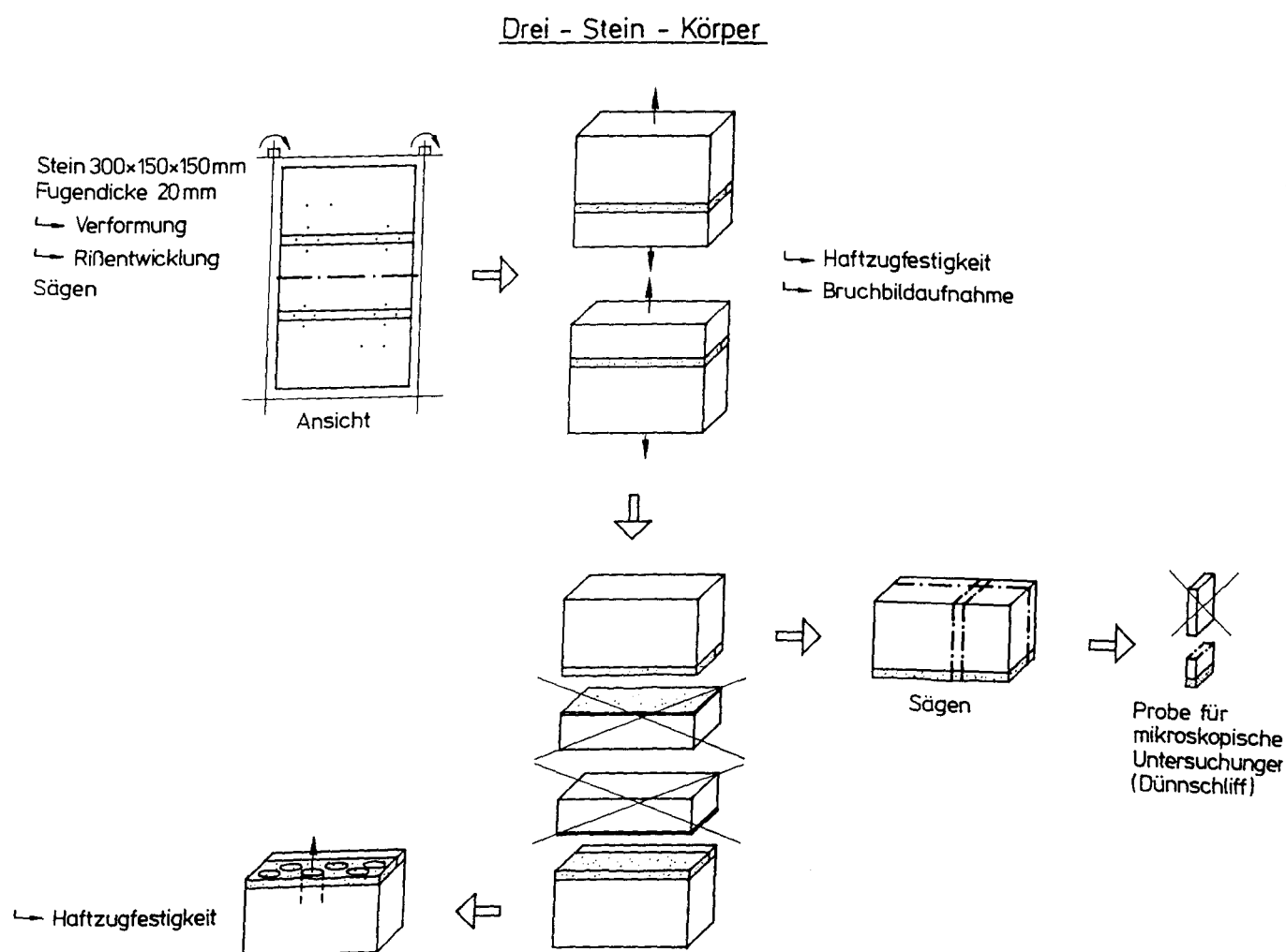


Abb. 2.7: Prüfschema Drei-Stein-Körper

Zunächst erfolgt der zentrische Zugversuch an jeder Fuge, d.h. der Prüfkörper wird im mittleren Stein geteilt. Aus diesem Versuch erhält man die Haftzugfestigkeit zwischen Stein und Mörtel. Außerdem ergibt die Analyse des Bruchbildes eine visuelle Aussage zur Feuchteverteilung und zur Art des Bruches. Ein typisches Bruchbild ist zur Veranschaulichung in der Abbildung 2.8 dargestellt.

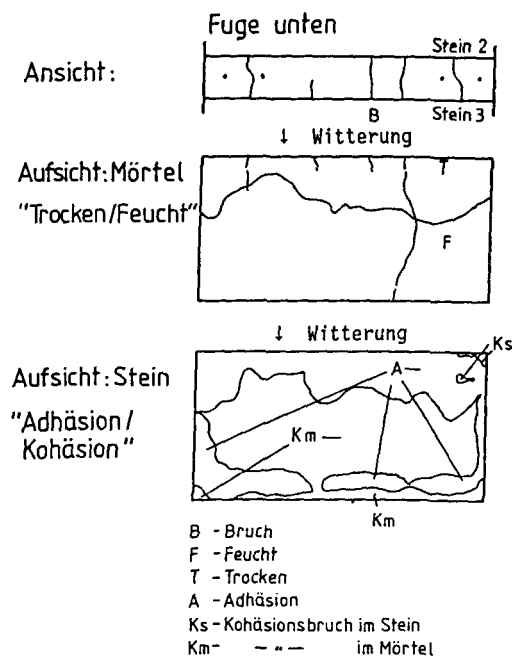


Abb. 2.8: Bruchbild eines Prüfkörpers

Folgende Brucharten können auftreten: Kohäsionsbruch im Stein oder im Mörtel oder ein Versagen in der Kontaktfläche, also Adhäsionsbruch. Die Haftzugfestigkeit kann nur bei reinem Adhäsionsbruch ermittelt werden, da es sich bei den Kohäsionsbrüchen um die Zugfestigkeit des betreffenden Materials handelt. In den meisten Fällen stellt sich ein kompliziertes Bruchbild aus mehreren Brucharten ein. Im Anhang wurden die Bruchbilder einiger Prüfkörper beigelegt.

An ausgewählten Prüfkörpern oder auch an solchen Prüfkörpern, die schon vor Ermittlung der Haftzugfestigkeit versagten, kann dann die Haftzugfestigkeit nach DIN 18555, Teil 6 /14/ ermittelt werden. Bei diesem Verfahren werden Bohrungen senkrecht zur

Steinflanke in den Mörtel-Stein-Verbund gesetzt und anschließend zentrisch gezogen. Durch die Anordnung der Bohrungen können Abhängigkeiten von der Fugentiefe erkannt werden. Darüberhinaus werden Dünnschliffe aus dem Kontaktbereich Mörtel-Stein angefertigt, um Ursachen für das Eintreten oder Ausbleiben des Verbundes zu erkennen.

2.3 Mörtelmodifizierung

Im Laufe der Verbundkörperuntersuchungen, die zunächst mit HGZ, HGJ und dem Sanierputz unternommen wurden, stellten sich einige Probleme in puncto Haftung am Stein, Verarbeitbarkeit und Schwinden des Mörtels, sowie der Witterungsbeständigkeit des Fugenstopfmörtels. Diesen Problemen wurde mit verschiedenen Maßnahmen begegnet, die sich auf die Zusammensetzung des Mörtels auswirkten.

Als wesentliche Maßnahme zur Schwindverringering wurde zu einem HGZ-ähnlichem Bindemittelsystem übergegangen, das aber an Stelle des Portlandzementes mit Quellzement hergestellt wurde /15/. Das Quellen setzt während des Abbindeprozesses, im noch nicht erstarrten Mörtel ein. Dazu wurden zwei verschiedene Quellzementtypen verwendet: zum einen ein normaler Quellzement des Typs K (HGQ) und zum anderen, wie in der ersten Serie auch, ein Gießeisreibinder (HGJ), der weniger stark quellende Komponenten enthält. Die Quellkomponente des HGQ ist C_4A_3S , die des HGJ $C_{12}A_7$. Weiter wurde im Sinne der Schwindverringering der Wasser-Bindemittel-Wert auf 0,35 gesenkt, gleichzeitig aber Verflüssiger eingesetzt, um die Verarbeitbarkeit zu gewährleisten. Außerdem wurde auch Methylcellulose zur Schwindreduzierung eingesetzt.

Zur Verbesserung der Haftung des Mörtels am Stein wurde die Benutzung eines Haftvermittlers - Mowilith - unumgänglich. Der Harzer Dolomit ist ein sehr dichtes Gestein und bietet dem Mörtel somit wenig Möglichkeiten zur mechanischen Verzahnung als Unterstützung der Haftung.

Die Feuchtegradienten, die sich in Abhängigkeit von der Fugentiefe bildeten, riefen Zwangsspannungen im Mörtel hervor. Dadurch kam es zu Flankenrissen, die sich bis zu einem vollständigen Abriß ausbreiteten. Zur Wahrung des guten Verbundes zwischen Fugenstopfmörtel und Stein wurde deshalb ein Deckmörtel erforderlich. Dieser Deckmörtel wird in die äußeren 2 cm der Fuge eingebracht und übernimmt im wesentlichen die Abdichtung der Fuge nach außen. Die tragende Funktion übernimmt der Fasermörtel in den tieferen Bereichen der Fuge. Als Deckmörtel wurden der in der ersten Serie als Fugenmörtel verwendete Sanierputz Re und ein vom Labor für Bau- und Werkstoffchemie in Siegen entwickelter Deckmörtel Si auf Hochofenzement/Weißkalkhydrat-Basis eingesetzt.

Die Untersuchungen mit den modifizierten Mörteln /16/ erfolgten zunächst an Zwei-Stein-Körpern, da die optimale Menge der jeweiligen Zusätze noch erprobt werden mußte. Der Erfolg der Modifizierung wurde anhand der Haftzugfestigkeit und anhand des Bruchbildes bewertet. So konnten aus einigen Prüfkörper-Serien schließlich folgende Rezepturen erarbeitet werden:

Tab. 2.1: Rezepturen der modifizierten Fasermörtel

Komponenten, bezogen auf das Bindemittel	HGZ modifiziert	HGJ modifiziert	HGQ modifiziert
x_{Fasern}	0,050	0,050	0,050
$x_{\text{Methylcellulose}}$	0,0026	0,0026	0,0026
x_{Mowilith}	0,025	0,025	0,025
x_{Formiat}	-	0,020	0,020
x_{Melment}	0,010	0,010	0,010
w/b	0,35	0,35	0,35

Die Rezepturen der Quellschleimmörtel sind bewußt im gleichen Maße modifiziert worden, um den Einfluß der unterschiedlichen quell-

fähigen Bestandteile deutlich zu erkennen. In der folgenden Tabelle 2.2 sind die Haftzugfestigkeiten der ursprünglichen Fasermörtel den Haftzugfestigkeiten der modifizierten Fasermörtel am Harzer Dolomit gegenübergestellt:

Tab. 2.2: Haftzugfestigkeitsvergleiche

Fasermörtel	$\beta_{\text{HZ}, 28\text{d}}$ unmodifiziert [N/mm ²]	$\beta_{\text{HZ}, 28\text{d}}$ modifiziert [N/mm ²]
HGZ	0,40	0,52
HGJ	0,30	1,18
HGQ	0,27	0,77

Wie man an den Ergebnissen erkennen kann, war die Modifizierung besonders für die Mörtel HGJ und HGQ erfolgreich. Die Modifizierung des HGZ erbrachte keine verbesserte Haftung am Dolomit.

Das Bruchbild veränderte sich generell mit zunehmender Modifizierung vom Adhäsionsbruch in der Grenzfläche zwischen Mörtel und Harzer Dolomit zum teilweisen Kohäsionsbruch mit anteiligem Bruchverlauf im Naturstein und selten im Mörtel. Ab einer Haftzugfestigkeit $\beta_{\text{HZ}} = 0,7 \text{ N/mm}^2$ kann zunehmend mit einem anteiligen Bruchverlauf im Harzer Dolomit gerechnet werden.

Nach dieser erfolgreichen Erprobung der vorgenommenen Optimierungsmaßnahmen wurde eine zweite Drei-Stein-Körper-Serie mit den quellfähigen Fasermörteln HGJ und HGQ eingeleitet. Im Oktober 1993 wurden an der Südseite der St.Johannis Kirche in Ellrich Drei-Stein-Körper aus Harzer Dolomit und HGJ- bzw. HGQ-Fasermörtel unter Verwendung von zwei verschiedenen Deckmörteln hergestellt und nach 14tägiger Nachbehandlung der Witterung ausgesetzt. Durch die Instrumentierung mit induktiven Wegaufnehmern und Setzdehnungsmeßstrecken sowie durch eingehende Beobachtung der Rißentwicklung, konnte die Entwicklung der Verbundqualität sehr gut erfaßt werden.

3 Ergebnisse

3.1 Eigenschaften des Dolomitsteins

Die für die Verbundproblematik maßgebenden Natursteineigenschaften sind die hygrischen und die mechanischen. Die Prüfung von Porenstruktur, Wasseraufnahme, E-Modul, Biegezug- und Druckfestigkeit stellt somit den wichtigsten Teil der Natursteinuntersuchungen dar. Darüberhinaus wurden die wichtigsten chemisch-mineralogischen Eigenschaften kurz zusammengefaßt, da die Verträglichkeit zwischen Mörtel und Naturstein gesichert sein muß. Es muß vorangestellt werden, daß Natursteine durch ihre Entstehung in den Eigenschaftswerten oft stark schwanken und daß es am sinnvollsten ist, die Schwankungsbreite z.B. der Druckfestigkeit anzugeben. Ein Mittelwert birgt die Gefahr, daß die Schwankungen nicht genügend berücksichtigt werden.

3.1.1 Chemisch-mineralogische Eigenschaften

Der Harzer Dolomit wurde in Steina bei Bad Sachsa am südlichen Harzrand abgebaut /17 bis 19/. Das typische Sedimentgestein aus dem Zechstein (geologisches Alter: 230 Mio Jahre) entstand aus einem oolithischen Kalkstein, dessen Feinstruktur durch fröhdiagenetische Dolomitisierung verwischt wurde. Das Gestein ist graubräunlich getönt und schwach gebändert. Unregelmäßig zackige Drucklösungssutturen (Stylolithen), die überwiegend parallel aber auch quer zur Schichtung verlaufen, sind charakteristisch. Abbildung 3.1 soll die Farbpalette des Harzer Dolomits am Beispiel der Nordfassade der St. Johannis Kirche im Bereich Chor/Querhaus zeigen: die Farben reichen von hellgrau/braun über verschiedene Zwischenstufen bis dunkelgrau/braun. Man muß allerdings beachten, daß einige Abschnitte jüngeren Datums sind, der Dolomit in diesen Bereichen also kürzere Zeit der Witterung ausgesetzt war. Ein solcher Neubauabschnitt scheint am Querhaus ab der achten Quaderreihe zu erkennen zu sein. Andererseits wurden im Wiederaufbau brauchbare, herabgestürzte Quader wieder verwendet.

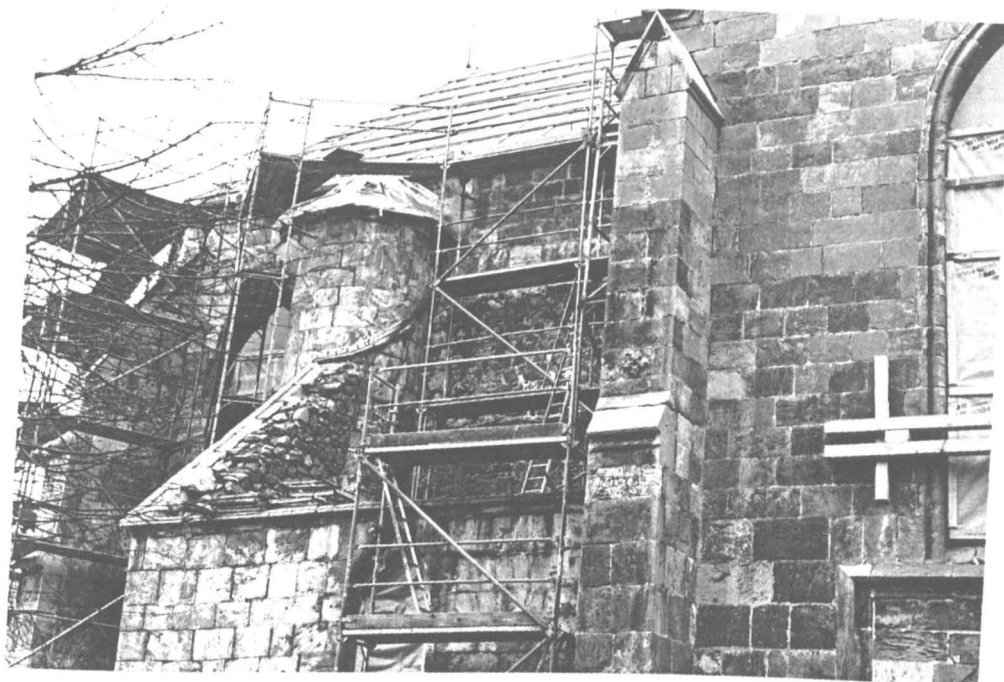


Abb. 3.1: Teilansicht des nördlichen Chores und Querhauses

Mineralogisch besteht der Harzer Dolomit zu 99 Vol.-% aus Dolomit und zu 1 Vol.-% aus Calcit mit geringen Anteilen Bindemittel. Ein sichtbarer Porenraum $> 5 \mu\text{m}$ ist kaum vorhanden; mit der Quecksilberdruckporosimetrie kann man knapp 4 Vol.-% ermitteln. Gute Festigkeit und Bearbeitbarkeit sowie große Verwitterungsbeständigkeit machen den Dolomit zu einem vorzüglichen Werkstein für den Hochbau. In neuerer Zeit werden auch Fußboden- und Wandbeläge sowie Grabsteine hergestellt. Anfällig ist das Gestein lediglich gegen den Lösungsangriff durch das Regenwasser; ernste Verwitterungsschäden treten aber, wie man beispielhaft an der mittelalterlichen Klosterruine in Walkenried sehen kann, kaum in Erscheinung. Der Großteil des Fördergutes aus dem Dolomit-Steinbrüchen am Harzsüdrand wird heutzutage zu Splitt und Sand für Putze und Mörtel verarbeitet; die Naturwerksteingewinnung ist demgegenüber unbedeutend.

3.1.2 Physikalisch-mechanische Eigenschaften

Die physikalischen und mechanischen Eigenschaften der Verbundpartner geben für die Dauerhaftigkeit des Verbunds Stein-Mörtel die wichtigsten Erkenntnisse.

Reindichte/Rohdichte, Porosität, Wasseraufnahme

Die Reindichte wurde nach der Pyknometer-Methode ermittelt, die Porosität mit dem Hg-Druckporosimeter und die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck nach DIN 52103 /20/. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 3.1 dargestellt:

Tab. 3.1: Dichte, Porosität und Wasseraufnahme des Dolomitsteins

Rohdichte [g/cm ³]	Reindichte [g/cm ³]	Porosität [Vol.-%]	Wasser- aufnahme [Gew.-%]
2,74	2,85	3,85	1,07

Roh- und Reindichte des Harzer Dolomits differieren nur geringfügig. Die gemessene Porosität ist mit 3,85 Vol.-% sehr niedrig und auch die Wasseraufnahme ist mit 1,07 Gew.-% niedrig. Es handelt sich um einen sehr dichten Stein, der eine schwache Kapillaraktivität besitzt. Zum kapillaren Verhalten liefert die Porenradienverteilung ergänzende Auskünfte. Die Abbildungen 3.2 und 3.3 zeigen die Porengrößenverteilungen zweier Dolomit-Varietäten, einer äußerlich etwas gröberen und einer feineren Gefügezusammensetzung.

Die Porenanalyse bestätigt die Schlußfolgerungen aus den Ergebnissen der Gesamtporosität. Die Porenverteilung des Harzer Dolomits hat ein schwaches Maximum bei 1,5 µm, die meisten Poren liegen noch darunter. Zur Verdeutlichung der streuenden Eigenschaften der Natursteine wurden vom Harzer Dolomit zwei Porenanalysen beigelegt: die dichtere Varietät 2 des Dolomits zeigt bei 0,2 µm ein zweites Maximum, es sind also mehr Poren im Feinstbereich anzutreffen.

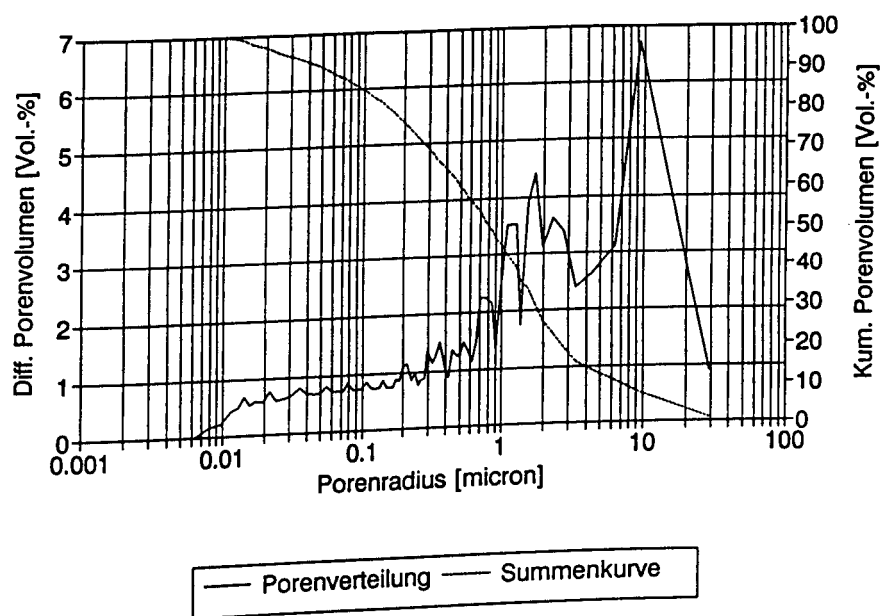


Abb. 3.2: Porenanalyse Harzer Dolomit Varietät 1

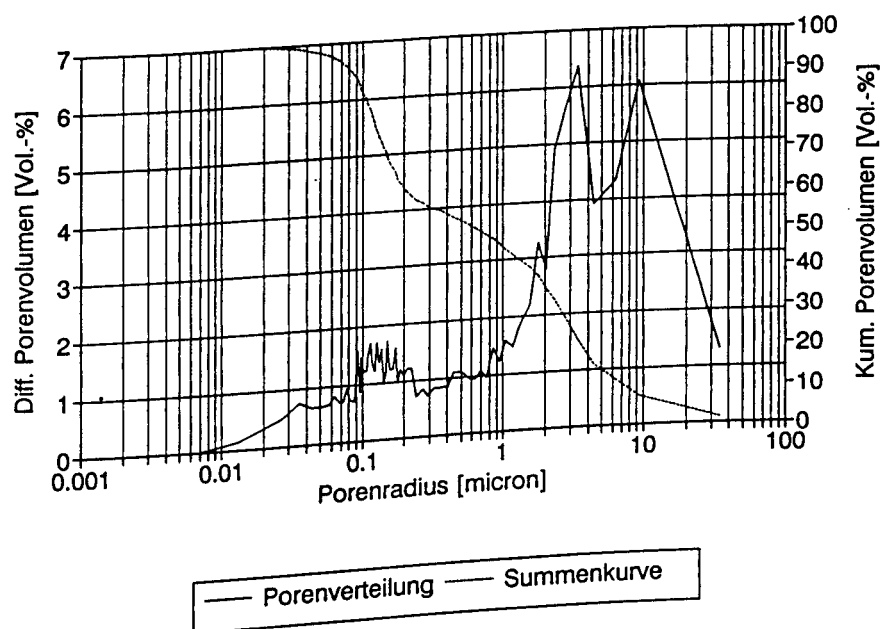


Abb. 3.3: Porenanalyse Harzer Dolomit Varietät 2

Zugfestigkeit, Druckfestigkeit, E-Modul

Die mechanischen Kennwerte wurden in Anlehnung an DIN 52105 /21/ und DIN 52112 /22/ ermittelt. Der dynamische E-Modul wurde durch die Schalllaufzeit bestimmt. Tabelle 3.2 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchungen.

Tab. 3.2: Zug-/Druckfestigkeit und E-Modul des Dolomitsteins

Spaltzug- festigkeit [N/mm ²]	Druck- festigkeit [N/mm ²]	Dyn. E-Modul [N/mm ²]
5,93 - 7,01	89,9 - 167,0	21500 - 81500

Die Spaltzugfestigkeit des Dolomits liegt bei $\beta_{sz} = 5,9$ bis $7,0$ N/mm². Der Dolomit besitzt eine hohe Druckfestigkeit, im Mittel größer als 90 N/mm², und einen sehr hohen E-Modul von 21,5 kN bis 81,5 kN.

Die Ergebnisse lassen erwarten, daß die Verbundkörper aus Harzer Dolomit und Verfugmörtel im Haftzugversuch am ehesten im Mörtel versagen, da die Zugfestigkeit des Dolomits sehr hoch ist und nur wenige Mörtel so hohe Werte erreichen. Die Zugfestigkeit ist so hoch, daß der Mörtel eher durch Kohäsionsbruch versagen könnte als der Stein.

Thermisch und hygrisch induzierte Verformungen des Mörtels unter Bewitterung sind wahrscheinlich deutlich höher als die des Dolomits. Das bedeutet einen erschwerten Haftverbund.

3.2 Eigenschaften des Altmörtels

Der Altmörtel in den Fugen der St. Johannis Kirche wurde in den vergangenen Jahren von der MPA BS und verschiedenen anderen Institutionen untersucht. Die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeiten für die Neuverfugung werden im folgenden Abschnitt zusammengefaßt und durch die Darstellung weiterer Untersuchungen ergänzt.

3.2.1 Zusammenfassung bisheriger Untersuchungen

An der MPA Braunschweig wurden naßchemisch und durch Röntgenfeinstrukturanalyse einige Mörtelproben aus dem Außen- und Innenbereich der Kirche untersucht /23/. Bei den Proben aus Kirchenschiff und Chor handelte es sich um reine Gipsmörtel mit geringen Anteilen an Anhydrit oder auch Halbhydrat. Die Verwitterung der Mörtel ist auf atmosphärische Verunreinigungen zurückzuführen, da die Löslichkeit des Gipses in schwach saurem Wasser deutlich erhöht ist. Die Verpreßmörtelprobe aus dem Turm-mauerwerk erwies sich als C_3A -freier und somit hochsulfatbeständiger Zement, der trotzdem an den Grenzflächen zum Gipsmörtel die Treibmineralien Thaumasit und Ettringit bildete. Bei den Untersuchungen der Ausblühungen vom südöstlichen Strebebfeiler wurden Glaubersalz ($Na_2SO_4 \cdot 10 H_2O$) und Gips in gleichen Anteilen nachgewiesen.

Bei Endoskopieuntersuchungen der MPA BS /24/ an Langhauswand und Strebebfeilern konnte festgestellt werden, daß die Langhauswand zweischalig gebaut ist. Das im Quaderverband hergestellte Außen-mauerwerk besteht aus einer ca. 35 cm dicken Außenschale; die Innenschale ist als Bruchsteinmauerwerk mit einer Dicke von 50 bis 65 cm gebaut. Die Strebebfeiler wurden wahrscheinlich auf ganzer Tiefe durchgemauert. Das Tragverhalten der Strebebfeiler ist eine Funktion der Mörtel- und Steindruckfestigkeit. Es wurde versucht, zusammenhängende Mörtelproben aus dem Mauerwerk zu gewinnen, was aber nur auf der Innenseite des Querhauses gelang. Mörtelplatten aus den Außenfugen zu gewinnen, ist sehr schwie-

rig, da der Mörtel bedingt durch hohe Feuchteaufnahme stark aufgeweicht ist und nicht zusammenhängt. Der Putzmörtel aus dem inneren Querhaus entspricht in seiner Zusammensetzung aber weitgehend dem Fugenmörtel aus den Strebepfeilern. An aus dieser Probe gesägten Prüfkörpern wurde die Druckfestigkeit im Stempel-druckverfahren nach Knöfel/Schubert /1/ ermittelt. Dabei wurde ein Mittelwert von $\beta_D = 3,65 \text{ N/mm}^2$ ermittelt. Man muß bei diesem geringen Wert jedoch beachten, daß die Festigkeit von Gips stark bei zunehmendem Feuchtegehalt abnimmt. Deshalb wurde nach dem Druckversuch der Prüfkörper deren Überschußfeuchte durch Trocknung bei 40°C bestimmt. Die Probe mit dem geringsten Druckfestigkeitswert von $2,42 \text{ N/mm}^2$ wies einen Feuchtegehalt von 13,10 M.-% auf, die mit dem höchsten erzielten Festigkeitswert von $5,96 \text{ N/mm}^2$ besaß dagegen nur 6,10 M.-% Feuchte. Nach /25/ müßte trockener Gipsfugenmörtel im Bauwerk eine Sorptionsfeuchte von etwa 2 M.-% aufweisen. Ein Gipsmörtel mit 25 M.-% Feuchte müßte dann einen Druckfestigkeitsverlust von ca. 35 % gegenüber dem trockenen Fugenmörtel besitzen. Diese Beziehung stimmt nicht mit den Messungen an dem Gipsmörtels aus der Fuge überein, so daß genauere Untersuchungen zur Sorptionsfeuchte von Gipsmörtel sowie der zugehörigen Druckfestigkeit z. Zt. an der MPA BS durchgeführt werden. Ferner wird versucht, das Schwind- und Quellverhalten dieser Mörtel bei Wasseraufnahme bzw. -abgabe zu ermitteln. Diese Untersuchungen sind für die Beurteilung des Tragverhaltens des Mauerwerks sehr wichtig, da bei sehr hoher Festigkeit des Steins die Festigkeit des Mörtels an Bedeutung gewinnt.

Die MPA Bremen untersuchte in einer ersten Orientierungskampagne Fugen- und Putzmörtel aus dem Innen- und Außenbereich der Kirche sowie einige Krustenproben mittels Lichtmikroskopie, RS-REM und EDX-Analyse /26/. Vom Außenmörtel wurde lediglich eine verwitterte Fugenprobe untersucht, bei der es sich ausschließlich um Gips handelte. Auf der Oberfläche ist der Gips zu einer Kruste verwittert. Des weiteren handelt es sich bei den rötlichen, schwarzen und weißen Krusten auf den Außenfugen um reine Gipsausblühungen. Die Gipskristalle sind tafelig und werden von

innen nach außen größer. Eine Kruste auf verbautem Naturstein erwies sich ebenfalls als Gips. Der darunterliegende Stein war bis in Tiefen von 1 mm zum Teil vergipst. Bei den Mörtelproben aus dem Innenbereich handelt es sich um reine Gipsmörtel oder um Gipsmörtel mit zahlreichen Zuschlägen wie Quarz, Feldspäte, Gips, Anhydrit, Dolomit, Holzstückchen oder Holzkohleteilchen.

Im Rahmen von Baugrunduntersuchungen analysierte das GUD Ingenieurbüro /27/ auch einige Mörtelproben aus Baugrund und Bohrkernen aus dem Turm. Alle Proben stellten sich als gipsgebundene Mörtel heraus, die im wesentlichen mit bis zu 1 cm großen Gipssteinkörnern gemagert wurden. In diesen Proben wurden keine bauschädlichen Salze außer Gips und Anhydrit nachgewiesen. Des weiteren fand man in Bereichen der Fundamentverbreiterung aus den 30er Jahren kalk- bzw. zementgebundene Mörtel. Hier wurde Ettringit nachgewiesen.

Als Ergebnis der bisherigen Untersuchungen läßt sich zusammenfassen, daß das aufgehende Mauerwerk weitestgehend mit reinem Gipsmörtel gemauert wurde. Das trifft offensichtlich auch für die Neubauabschnitte nach den Feuerausbrüchen zu. Als Magerung sind im wesentlichen Gipsstein und Holzkohle verwendet worden. Lediglich im Turmmauerwerk läßt sich auch Zementinjektionsgut aus den dreißiger Jahren finden. Für die Neuverfugung ist maßgeblich, daß der Saniermörtel mit Gips als Altmaterial verträglich sein muß.

3.2.2 Ergänzende Untersuchungen

Im Rahmen der Vorbereitungen zur Musterfläche wurde die gesamte Fassade des nördlichen Querhauses hinsichtlich der vorhandenen Fugenmörtel überprüft. Typische Erscheinungsbilder der Fugenmörtel zeigen die Abbildungen 3.4 und 3.5. Dabei wurden überwiegend angelöster Gips-Fugenmörtel (Abb. 3.6) und zwei verschiedene Verfugmörtel (Abb. 3.7 und 3.8) aufgefunden.

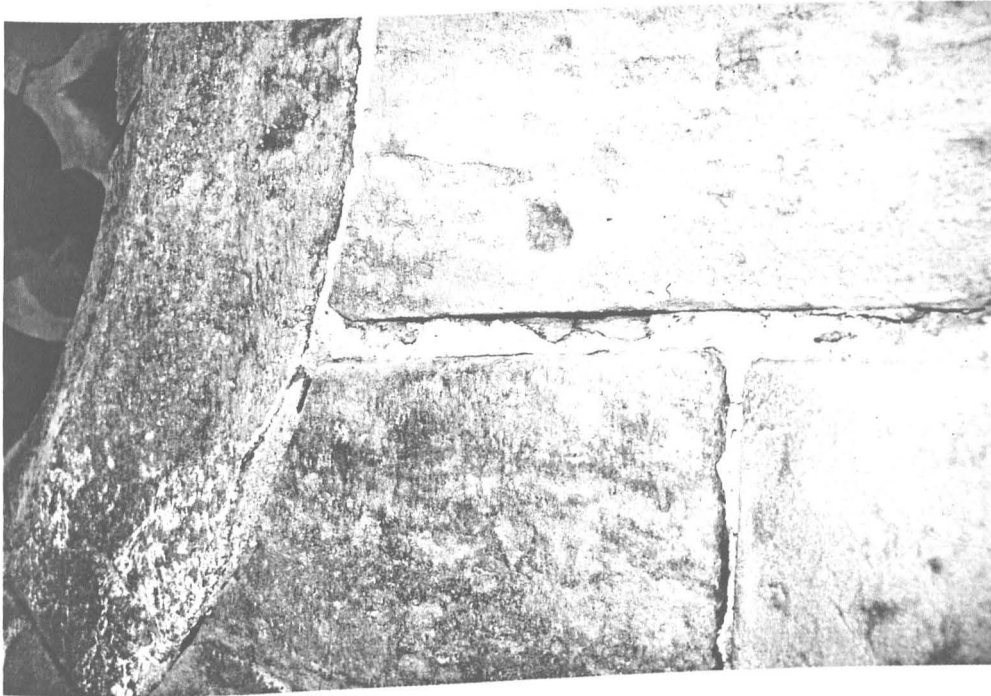


Abb. 3.4: Gipsmörtel-Fuge im Giebel der Musterfläche

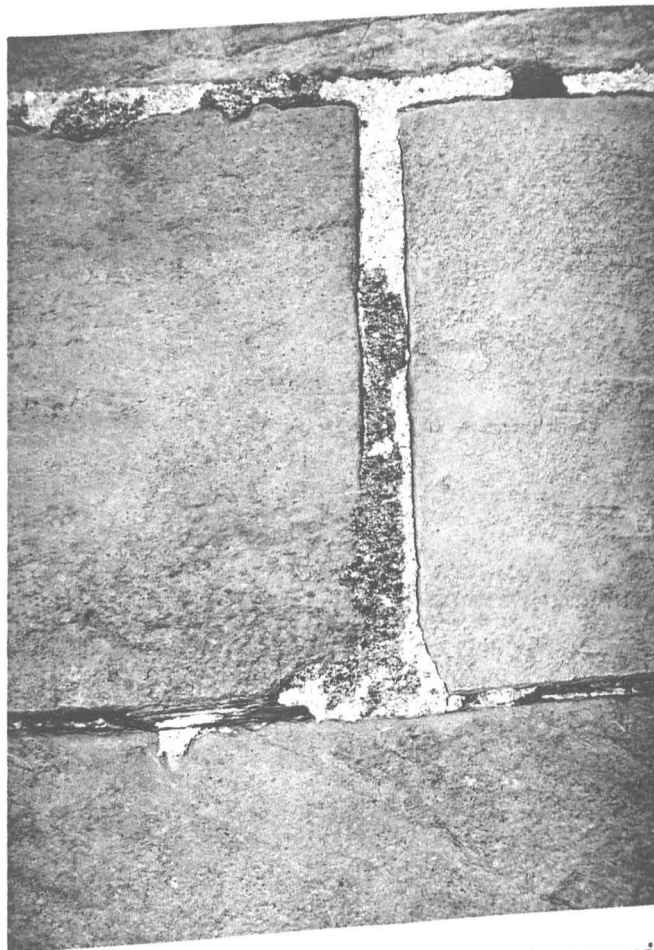


Abb. 3.5: Gips-Verfugmörtel, starke Flankenrisse, Hohlfugen

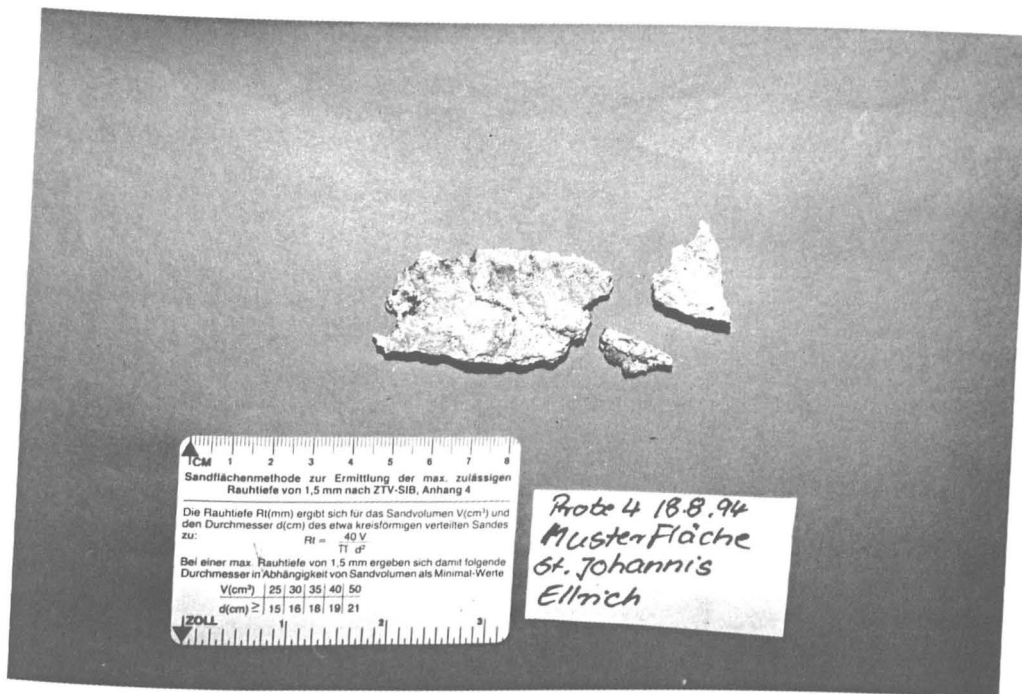


Abb. 3.6: Gipsaltmörtel aus der Fuge, ca. 3 mm starke Platte

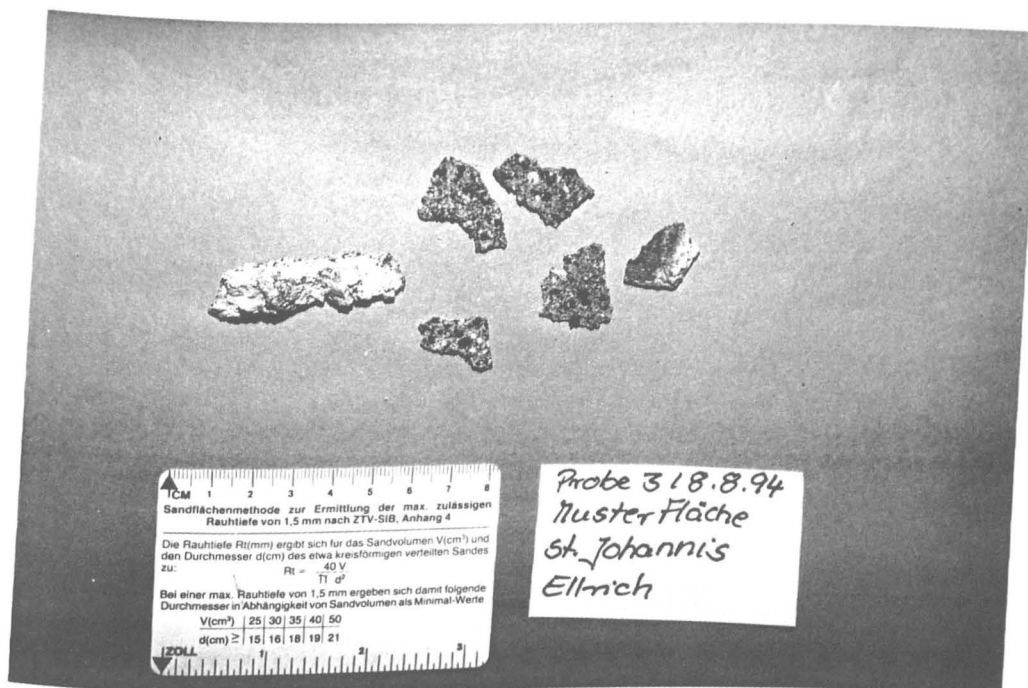


Abb. 3.7: Verfugmörtel I: Gips mit Holzkohle und Anhydrit ver-
setzt, angelöst

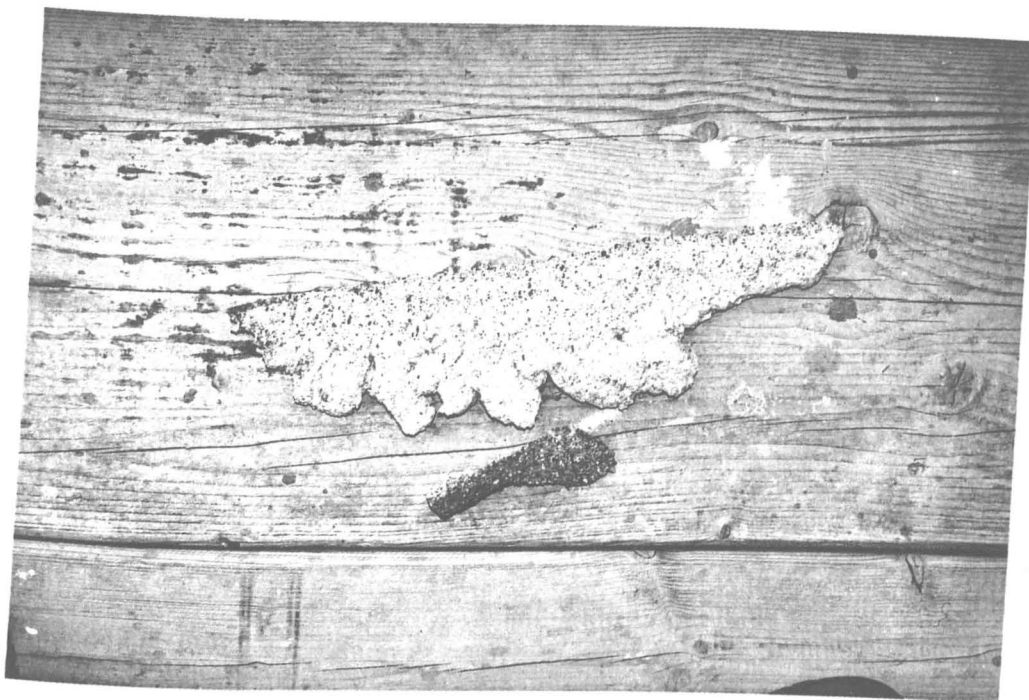


Abb. 3.8: Verfugmörtel I: obere Kante der Probe ca. 30 cm lang

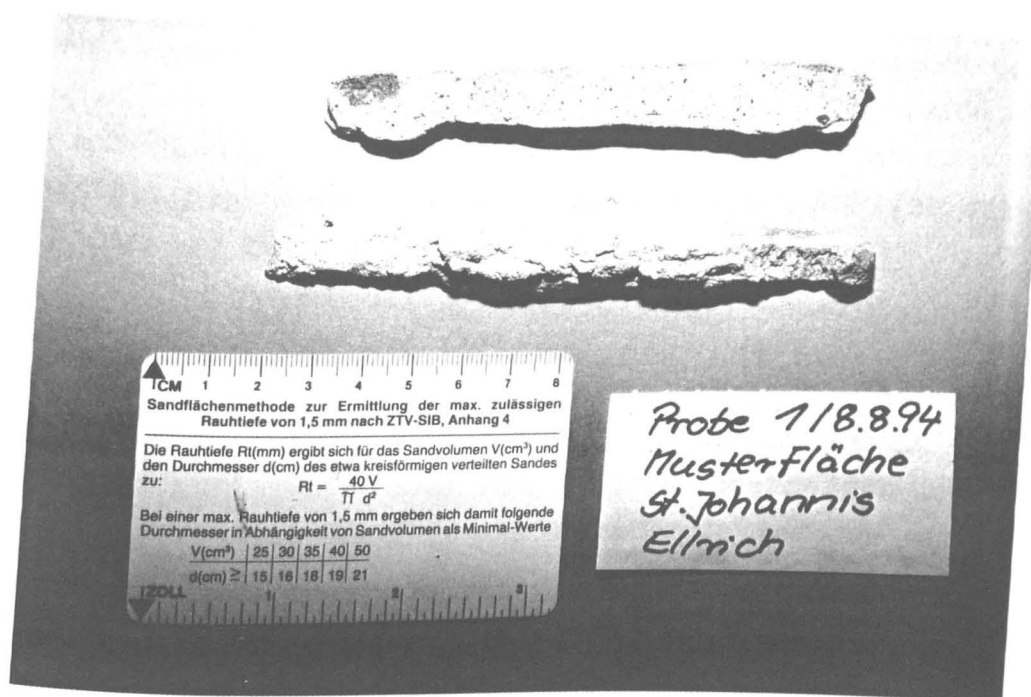


Abb. 3.9: Verfugmörtel II: Kalk- oder Kalk/Zement-Mörtel mit Sand versetzt

Tab. 3.3: Chemische Analyse der drei Mörtelarten [Gew.-%]

Analyse	Gips-Fugenmörtel	Verfugmörtel I Gips	Verfugmörtel II Kalk/Zement
Glühverlust 350 °C	5,51	4,16	20,81 bei 1000 °C
Salzsäure- unlösliches	0,81	4,31	7,43
SiO ₂	2,49	0,56	13,30
Fe ₂ O ₃	n.n.	0,40	1,95
Al ₂ O ₃	0,16	0,40	6,41
TiO ₂	0,04	n.n.	0,57
CaO	37,93	32,44	38,81
MgO	0,78	2,06	7,65
SO ₃	51,93	45,73	2,65
Rest	0,35	9,94	0,42
Summe	100,00	100,00	100,00

n.n. = nicht nachgewiesen

Bei den Verfugmörteln handelte es sich um einen Gipsmörtel (Verfugmörtel I), der stark mit Holzkohle versetzt wurde, und um einen mit Sand gemagerten Kalk- oder Kalk/Zementmörtel (Verfugmörtel II). Dieses geht aus der naßchemischen Analyse der Mörtel nach Trocknung bei 105 °C hervor.

Konsequenzen für den Verträglichkeitsnachweis ergeben sich aus diesen ergänzenden Untersuchungen nicht. Bei dem Verfugmörtel II handelt es sich zwar um einen nicht gipsgebundenen Mörtel, dieser Verfugmörtel wurde aber nur selten angetroffen und ist nur im oberflächennahen Bereich bis 1 cm Fugentiefe vertreten.

3.3 Eigenschaften des Verfugmörtels

Hinsichtlich der Verträglichkeit gegenüber dem Gipsaltmörtel wurden zwei unterschiedliche Mörtelsysteme ausgewählt. Zunächst wurden zwei Faserstopfmörtel, die vom WKI entwickelt wurden /28-30/, und ein marktüblicher Sanierputz der Firma Remmers /31/ für das Drei-Stein-Körper-Programm in Walkenried, auf dem Freigelände der MPA und in der Klimakammer verwendet. In einem zweiten Versuchsabschnitt wurde ein dritter Faserstopfmörtel, mit einer anderen Zementkomponente, erprobt.

Alle Fasermörtel bestehen aus 85-90 % Hüttensand, einem 5-%igen Anteil von Anhydrit als Sulfatträger und einem 5- bis 10-%igen Zusatz einer spezifischen Komponente, die im einzelnen noch erläutert wird. Die Magerung erfolgt mit Ligno-Cellulose-Fasern, die aus Altpapier hergestellt werden. Die folgende Tabelle gibt den Anteil der verschiedenen Komponenten der Fasermörtel wieder:

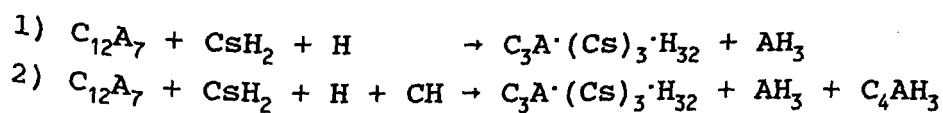
Tab. 3.4: Bindemittelsysteme der Faserstopfmörtel

Binde- mittel	Hüttensand [Gew.-%]	Anhydrit [Gew.-%]	Zusatzkomponente [Gew.-%]
HGZ	85	10	5 PZ 45 F
HGQ	85	10	5 Quellzement
HGJ	90	5	5 Gießereibinder

Auf der Grundlage dieser Zusammensetzung wurden die Mörtel mit Zusatzmitteln versehen, die z.B. die Verarbeitbarkeit oder den w/b-Wert beeinflussen, dazu Kapitel 2.3.

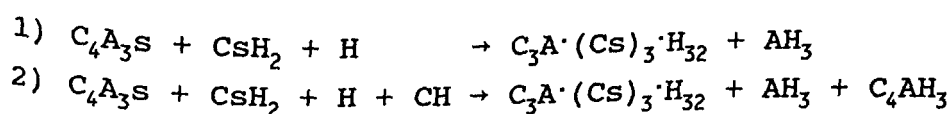
Der HGZ enthält PZ 45 F als Zusatzkomponente, die für die erforderliche Festigkeit des Bindemittelsystems verantwortlich ist. Die Reaktionsfähigkeit des Hüttensandes, der im wesentlichen das Bindemittelsystem trägt, wird durch den Einsatz des Portlandzementes erhöht.

Die Zusatzkomponente des HGJ /15/ ist ein Gießereibinder mit sehr kurzer Erstarrungszeit und hoher Endfestigkeit. Er besitzt quellfähige Bestandteile, die das Schwinden ausgleichen. Dieses Quellen wird durch einen 9- bis 10-%igen $C_{12}A_7$ -Anteil hervorgerufen und entspricht somit dem Typ M (Mikhailov) der Ettringit bildenden Quellzemente. Die möglichen Hydratationsgleichungen können folgendermaßen beschrieben werden /28/ (nicht stöchiometrisch):



Darüberhinaus wird dem HGJ zur Beschleunigung der Hüttensand-Reaktivität 2 % Calciumformiat zugesetzt.

Auch der HGQ enthält einen Ettringit bildenden Quellzementzusatz. Die quellfähige Zementphase ist hier das C_4A_3S . Dieser Quellzementtyp wird nach Klein Typ K genannt. Folgende Hydratationsgleichungen können dazu aufgestellt werden /28/:



Die Hydratation verläuft mit einer vergleichsweise gleichmäßigen Reaktionsrate, so daß das gesamte C_4A_3S in Ettringit umgewandelt wird. Dieses sich während der Hydratation bildende Ettringit ist für das Bauwerk nicht schädlich, da die für das Quellen erforderlichen Ausgangsbestandteile aus dem Mörtel selber stammen und nicht etwa aus der Kombination Gipsaltmörtel - Verfugmörtel.

Bei dem Sanierputz handelt es sich nach Herstellerangaben um einen gipsverträglichen Mörtel, der sowohl für Putz- als auch für Fugarbeiten historischer Bauten geeignet ist. Bekannt ist, daß dieser Mörtel mit Styroporkugeln und Bimsstein gemagert ist. Weiteres zur Zusammensetzung ist den Berichterstatern nicht bekannt.

3.3.1 Chemisch-mineralogische Eigenschaften

Chemische Analyse

Alle Bindemittel und der Sanierputz wurden einer naßchemischen Analyse unterzogen. Zuvor wurde der Sanierputz einer Abtrennung der Styroporkugeln unterzogen, um auch hier eine Aussage über die Zusammensetzung des Bindemittels zu erreichen. Die oxidische Zusammensetzung ist den Tabellen A.1 bis A.4 im Anhang zu entnehmen. HGJ und HGQ sind sich in der Zusammensetzung weitgehend ähnlich: beide enthalten ca. 31 - 33 Gew.-% SiO_2 , ca. 42 Gew.-% CaO , ca. 10 Gew.-% Al_2O_3 und auch der Anteil an Alkalien (Na_2O und K_2O) von in der Summe 0,9 Gew.-% liegt im gleichen Bereich. Sie unterscheiden sich jedoch deutlich in bezug auf ihren Sulfatgehalt: HGJ enthält ca. 3,5 Gew.-% und der HGZ ca. 6,0 Gew.-% SO_3 .

Das Bindemittel des Sanierputzes zeigt einen sehr hohen Gehalt an salzsäureunlöslichen, d.h. organischen Zusätzen. Geht man davon aus, daß die Abtrennung der Styroporkugeln vollständig war und daß der Rest Bindemittel ist, so fällt der hohe Al_2O_3 -Gehalt von ca. 15,0 Gew.-% und der niedrige SO_3 -Gehalt von ca. 1,1 Gew.-% auf.

Röntgenbeugung

Zur weiteren Klassifizierung wurde die Röntgenbeugung herangezogen. HGZ, HGQ und HGJ enthalten zwar zu 85 bzw. 90 % die röntgenamorphe Phase Hüttensand, sollten aber trotzdem - aufgrund der unterschiedlichen Zusatzkomponenten - ein charakteristisches Beugungsdiagramm ergeben.

Die kristallinen Bestandteile des HGZ sind im wesentlichen Anhydrit, Gips, C_3S und $\beta\text{-C}_2\text{S}$. HGJ und HGQ enthalten mehr Anhydrit und Gips, als Klinkerphase nur C_3S , kein C_2S . Die quellfähigen Zementphasen konnten nicht nachgewiesen werden. Der Sanierputz besteht aus Calcit, Quarz, Gips und Anhydrit, Klinkerphasen wurden nicht nachgewiesen.

3.3.2 Physikalisch-mechanische Eigenschaften

Reindichte, Spez. Oberfläche, Korngrößenverteilung

Außerdem wurden die Reindichte, die Spezifische Oberfläche nach Blaine und die Korngrößenverteilung der Mörtel ermittelt. Die Reindichte wurde nach dem Pyknometer-Verfahren bestimmt, die spezifische Oberfläche mit der Durchströmzelle nach Blaine. Die folgende Tabelle 3.5 zeigt diese Kennwerte der Mörtel:

Tab. 3.5: Reindichte und spez. Oberfläche der Bindemittel

Binde- mittel	Reindichte [g/cm ³]	Spez. Oberfläche Blaine [cm ² /g]
HGZ	2,88	4000
HGQ	2,87	3760
HGJ	2,90	3760
Sanierputz Re	2,39	n.b.*

* = Die Bestimmung der Spezifischen Oberfläche nach Blaine erwies sich beim Sanierputz als nicht durchführbar, da das Material zu grob war

Die Reindichten aller Bindemittel liegen um 2,9 cm²/g, die des Sanierputzes um 2,4 cm²/g, also deutlich niedriger. Auch die Spezifischen Oberflächen von HGZ und HGJ sind mit 4000 bzw. 3760 cm²/g näherungsweise zu vergleichen.

Die Korngrößenverteilung wurde mittels der Siebanalyse bestimmt, die Ergebnisse zeigt die folgende Tabelle 3.6. Der Feinkornanteil der Fasermörtel scheint wesentlich höher zu sein als beim Sanierputz. Dazu muß gesagt werden, daß es sich bei den beiden Fraktionen 0,5 bis 1,0 und 1,0 bis 2,0 um die Styropor- und Sandmagerung des Fertigputzes handelt. Eine Abtrennung der Magerung war für eine für die Siebanalyse brauchbare Menge jedoch nicht durchführbar.

Tab. 3.6: Korngrößenverteilung der Mörtel

Kornklasse [mm]	HGZ [Gew.-%]	HGQ [Gew.-%]	HGJ [Gew.-%]	Sanierputz Re [Gew.-%]
0,000-0,032	93,5	90,5	93,5	Kornklasse 0,000-0,500 70,0
0,032-0,040	3,0	4,5	3,0	
0,040-0,063	2,5	1,5	2,0	
0,063-0,090	0,0	1,5	1,0	
0,090-0,125	1,0	1,0	0,5	
0,125-0,250	—	1,0	—	
0,250-0,500	—	—	—	23,0
0,500-1,000	—	—	—	
1,000-2,000	—	—	—	
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0

Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit und Rohdichte

Die Festigkeiten und die Rohdichten der fasergemagerten Mörtel wurden in Anlehnung an DIN EN 196 /32/ ermittelt. Der Dynamische E-Modul wurde nach dem Verfahren der longitudinalen Schallwelle geprüft. In der folgenden Tabelle 3.7 wurden die Ergebnisse dieser Untersuchungen zusammen mit den Ergebnissen von normsandgemagerten Mörteln /28-31/ dargestellt. Der Sanierputz wurde nach Herstellerangaben verarbeitet und anschließend normgemäß geprüft.

Tab 3.7: Biegezug-/Druckfestigkeit sowie Rohdichte der sand- bzw. fasergemagerten Mörtel nach 28 Tagen

Mörtel	LC-Faser-Magerung				Normsand-Magerung		
	Zugfestigkeit [N/mm ²]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	Rohdichte [g/cm ³]	Dyn. E-Modul [N/mm ²]	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	Rohdichte [g/cm ³]
HGZ	3,57	39,90	1,69	15364	5,03	44,30	1,95
HGQ	3,32	47,70	1,78	16347	7,92	43,75	1,98
HGJ	3,36	46,79	1,82	14920	10,34	45,69	2,00
Sanierputz Re	—	—	—	2730	1,58	4,07	0,745

Die Faserbewehrung bewirkt eine geringere Rohdichte und daher auch einen niedrigeren E-Modul. Der E-Modul des Sanierputzes ist durch die Styroporkugeln besonders niedrig. Je niedriger der E-Modul, umso eher können Verformungen vom Material ertragen werden. Das bedeutet aber auch, daß die Festigkeiten sinken. Die Druckfestigkeit des Sanierputzes liegt bei $\beta_D = 4,07 \text{ N/mm}^2$, die Biegezugfestigkeit bei $\beta_{BZ} = 1,58 \text{ N/mm}^2$. Die Druck- und Zugfestigkeiten der Faserstopfmörtel liegen in deutlich besseren Bereichen.

3.4 Verbunduntersuchungen

3.4.1 Versuchsprogramm

Mit allen vorgestellten Mörteln und dem Dolomit wurden Untersuchungen an bewitterten Drei-Stein-Körpern durchgeführt. Die folgende Tabelle 3.8 zeigt das gesamte Versuchsprogramm:

Tab. 3.8: Versuchsprogramm Drei-Stein-Körper

Auslagerungszeitpunkt	Mörtel	Prüfkörper	Bewitterungsart
1. Serie Mai 1992	HGZ	D1, D2	Klimakammer
	HGJ	D3, D4	
	Sanierputz Re	D5, D6	
	HGZ	D7, D8	Freibewitterung Braunschweig
	HGJ	D9, D10	
	Sanierputz Re	D11, D12	
	HGZ	D13, D14	Freibewitterung Walkenried
	HGJ	D15, D16	
	Sanierputz Re	D17, D18	
2. Serie Oktober 1993	HGJ	D19, D20	Freibewitterung Ellrich
	HGJ/Re	D21, D22	
	HGJ/Si	D23, D24	
	HGQ	D25, D26	Freibewitterung Ellrich
	HGQ/Re	D27, D28	
	HGQ/Si	D29, D30	

Der Sanierputz wurde in der ersten Serie als Verfugmörtel erprobt, da er nach Herstellerangaben für einen solchen Einsatz durchaus geeignet ist. In der zweiten Drei-Stein-Körper-Serie wurde dieser Mörtel dann als Fugendeckmörtel eingesetzt, da er durch seinen niedrigen E-Modul einen hervorragenden Fugenabschluß darstellt, also nur die vorderen 2 bis 3 cm der Fuge ausfüllt.

3.4.2 Serie 1

Bei allen Dolomit-Mörtel-Kombinationen der 1. Serie stellte sich hinsichtlich der Verformungen des Steins das gleiche Bild ein: der Dolomit reagiert nur sehr schwach auf wechselnde klimatische Bedingungen. Nur bei großen Unterschieden in der Luftfeuchtigkeit - besonders bei den Versuchen in der Klimakammer - konnten geringe Dehnungen bzw. Stauchungen an den Meßstrecken in der Größenordnung von $\epsilon = 0,5$ bis $1,0 \%$ gemessen werden.

Die Rißanalysen und die damit in Zusammenhang stehenden Verformungsmessungen an den horizontalen und den vertikalen Meßstrecken der Fuge lassen erkennen, daß die Haftung zwischen den nicht modifizierten Faserstopfmörteln und dem Dolomitstein sehr schlecht ist. An allen Prüfkörpern (D1 bis D4, D7 bis D10, D13 bis D16) bildeten sich im Laufe des Bewitterungszeitraums Flankenrisse, die sich meist bis über die gesamte Fugenlänge ausbreiteten. Das bedeutet, daß der Faserstopfmörtel unter Zwangsspannung stand. Zwangsspannungen treten auf, wenn der Mörtel an Verformungen normal zur Fugenflanke (durch die Zwängung) gehindert wird. Bei Verwendung des Sanierputzes (D5, D6, D11, D12, D17, D18) entstanden keine Flankenrisse.

Bei allen Prüfkörpern wurden Querrisse, die senkrecht zur Fugenebene verlaufen, beobachtet. Diese Querrisse entstehen aufgrund von Eigenspannungen, die sich durch thermische und hygrische Gradienten in Richtung Fugentiefe einstellen. Beim Sanierputz entstanden stets in größerem Abstand 3 bis 5 Querrisse pro Fuge. Das Gleiche konnte bei beiden Faserstopfmörteln in der Klimakammer beobachtet werden. Die unter Freibewitterung gelagerten Prüfkörper aus HGJ oder HGZ wiesen jedoch eine erheblich höhere Anzahl von bis zu 20 Rissen in kürzerem Abstand zueinander auf. Das hängt sicher mit der wesentlich komplexeren Witterungsbeanspruchung und dem längeren Bewitterungszeitraum zusammen. Es stellen sich andere Temperatur- und Feuchtegradienten längs der Fuge ein.

Prinzipiell verlaufen alle gemessenen Verformungen so, daß sie sich in eine Richtung verstärken. Ein Mörtel, der auf die erste Klimabeanspruchung mit Dehnen reagiert, wird sich auch im Laufe der Beanspruchung noch weiter dehnen. Auch wenn zum Beispiel bei niedrigerer Luftfeuchtigkeit eine Verkürzung der Meßstrecke eintritt, wird die bei anschließend erhöhter Luftfeuchtigkeit eintretende Dehnung höher sein als die zuvor gemessene.

Die vertikalen Verformungen ϵ 1 der Faserstopfmörteln lagen bei den Klimakammerversuchen im negativen Bereich zwischen 0,0 und - 30,0 mm/m, auf dem Freigelände stets im positiven Bereich zwischen 0,0 und + 60,0 mm/m. Die horizontalen Meßstrecken auf der Fuge wiesen in der Klimakammer + 20,0 bis - 90,0 mm/m auf, unter Freibewitterung zwischen 0,0 und + 60,0 mm/m. Beim Sanierputz traten an der vertikalen und der horizontalen Meßstrecke in der Klimakammer 0,0 bis - 30,0 mm/m auf, unter Freibewitterung 0,0 bis + 30,0 mm/m.

Die Klimakammeruntersuchungen wurden nach 16 bzw. 20 Wochen beendet. Die Freibewitterungsversuche dauerten wesentlich länger an: sie erstreckten sich auf 54 Wochen Auslagerungsdauer. Der Abbaetermin wurde so spät gewählt, weil mindestens eine komplette Bewitterungsperiode abgelaufen sein sollte. Eine Verlängerung der Auslagerung war nicht sinnvoll, da nach Beurteilung des Abriß- und Verformungsbildes feststand, daß der Haftverbund stark vermindert worden war. Nach Abbau wurde die zentrische Haftzugfestigkeit ermittelt. An einigen Prüfkörpern war nach der Bewitterung der Haftverbund einer Stein-Mörtel-Kontaktfläche bereits erschöpft. An diesen wurde der Haftzugversuch nach DIN 18555 /14/ an einer intakten Kontaktfläche durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.9 zusammengestellt:

Tab. 3.9: Haftzugfestigkeit an Drei-Stein-Körpern, Serie 1

Mörtel	Bewitterungsart	Haftzugfestigkeit β_{HZ} [N/mm ²]
HGZ	Klimakammer	0,0
	Freibewitterung Braunschweig	0,1 1,5 DIN 18555
	Freibewitterung Walkenried	0,0 0,1 - 1,5 DIN 18555
HGJ	Klimakammer	0,1 - 0,4
	Freibewitterung Braunschweig	0,01
	Freibewitterung Walkenried	0,0 - 0,6
Sanierputz Re	Klimakammer	0,05
	Freibewitterung Braunschweig	0,0 - 0,1
	Freibewitterung Walkenried	0,0 - 0,1

Die Ergebnisse zeigen eine ausgesprochen niedrige Haftzugfestigkeit zwischen allen verwendeten Mörteln und dem Dolomit. Die ermittelte Kraft wurde stets auf die gesamte Steinflanke bezogen. Als Anhaltswert ist für einen Fugenmörtel eine Haftzugfestigkeit β_{HZ} von mindestens 0,4 bis 0,6 N/mm² empfohlen. Lediglich beim HGJ konnten zum Teil brauchbare Werte erzielt werden.

Die Bruchbildanalyse ergab, daß in fast allen Fällen ausschließlich Adhäsionsbruch zwischen Mörtel und Stein auftrat. Das läßt den Schluß zu, daß es sich bei den ermittelten Zugfestigkeiten tatsächlich um die "wahre Haftzugfestigkeit" handelt. Bei teilweisem Kohäsionsbruch hätte man die Adhäsionsbruchfläche ausmessen müssen, um zur Haftzugfestigkeit zu gelangen.

Aus der Betrachtung einiger Dünnschliffe geht hervor, daß auch keine mikroskopisch kleinen Mörtelreste auf der Steinflanke haften. Die Steinflanke ist so dicht, daß eine Haftung extrem erschwert wird.

3.4.3 Serie 2 - Modifizierte Mörtel

Die schlechten Ergebnisse aus der ersten Serie der Dolomit-Verbundkörperuntersuchungen verlangten eine Modifizierung der Mörtel hinsichtlich einer Haftungsverbesserung und einer Schwindreduzierung. Die Optimierungsschritte wurden im einzelnen bereits im Kapitel 2.3 beschrieben. Umgesetzt wurden sie an einer zweiten Drei-Stein-Körper-Serie, die der Freibewitterung in Ellrich ausgesetzt wurde. Erste Zwischenergebnisse dieser Untersuchungen wurden in /33/ vorgestellt.

Bei dieser zweiten Bewitterungskörper-Serie wurden neben den Drei-Stein-Körpern auch Vier-Stein-Körper aufgebaut, mit deren Hilfe es möglich sein sollte, den zeitlichen Verlauf der Verbundqualität zu überprüfen. Diese Vier-Stein-Körper bestehen aus vier Steinquadern (11 cm hoch, 15 cm tief, 30 cm lang) mit drei Lagerfugen. Jede dieser Fugen wurde auf eine andere Art gestopft: die obere Fuge jeweils mit HGJ oder HGQ ohne Deckmörtel, die mittlere mit HGJ oder HGQ und dem Deckmörtel Re, die untere Fuge mit HGJ oder HGQ und dem Deckmörtel Si (Abb. 3.10).

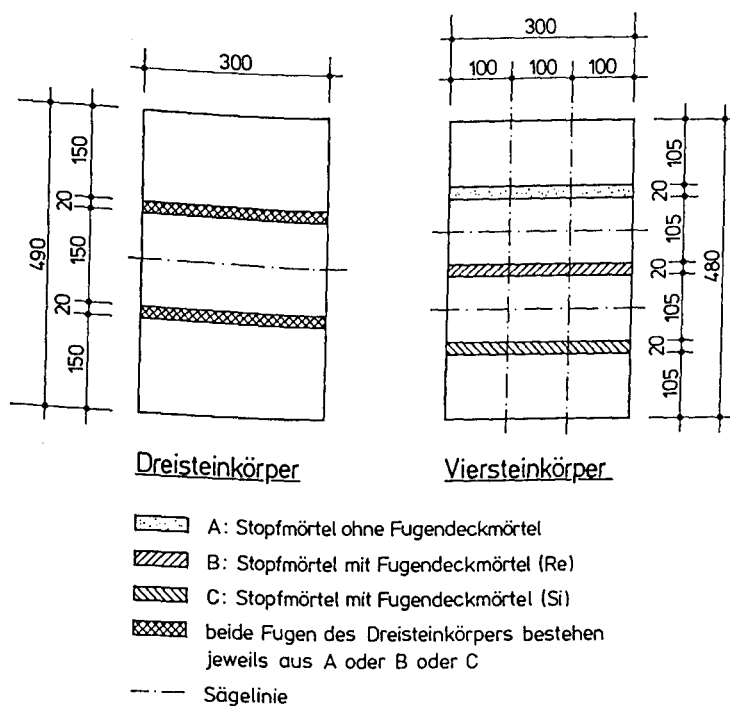


Abb. 3.10: Vier-Stein-Körper, schematisch

Nach einer bestimmten Auslagerungsdauer wurden jeweils ein HGJ- und ein HGQ-Vier-Stein-Körper abgebaut und geprüft. Dazu wurden jeweils Sägeschnitte - ohne Wasser - mittig im zweiten und im dritten Stein parallel zur Fuge durchgeführt, um so jeweils drei Haftzug-Prüfkörper zu erhalten. Diese wurden trocken in Zwei-Stein-Körper mit einem Querschnitt von ca. 10 cm x 10 cm gesägt. Nach den bereits vorgestellten Verfahren wurden dann die Haftzugfestigkeit und das Bruchbild ermittelt.

Tab. 3.10: Vier-Stein-Körper, Prüftermine, Ergebnisse der Haftzugprüfung

Stopfmörtel	Prüfkörper	Abbau-/Prüftermin	Haftzugfestigkeit β_{HZ} [N/mm ²]
HGJ	D32	nach 1 Monat	1,17
	D31	nach 3 Monaten	1,41
	D34	nach 7 Monaten	0,75
	D33	nach Abbau der HGJ-Drei-Stein-Körper	noch nicht abgebaut
HGQ	D36	nach 1 Monat	0,02
	D35	nach 3 Monaten	0,28
	D38	nach 7 Monaten	0,29
	D37	nach Abbau der HGQ-Drei-Stein-Körper	0,09

Diese Ergebnisse stellen natürlich nur einen Trend dar, da für statistische Aussagen zu wenige Prüfkörper zur Verfügung standen. Die ermittelte Haftzugfestigkeit aller Haftzug-Prüfkörper wurde auf den Flächenanteil des Faserstopfmörtels bezogen, da davon ausgegangen werden kann, daß der Verfugmörtel Re eine sehr geringe Haftung am Stein aufweist und der Verfugmörtel Si jeweils bis zu seiner ganzen Tiefe vom Stein abgerissen war. Es läßt sich zumindest tendentiell erkennen, daß die Haftzugfestigkeit zwischen dem modifizierten HGJ-Faserstopfmörtel und dem Dolomitstein zu allen Prüfterminen wesentlich größer ist als die zwischen modifiziertem HGQ-Faserstopfmörtel und Stein. Der Wert der Haftzugfestigkeit des HGJ nach 7 Monaten mit $\beta_{HZ} = 0,75 \text{ N/mm}^2$

scheint ein Ausreißer zu sein, da die Werte nach einem und drei Monaten jeweils über $1,0 \text{ N/mm}^2$ lagen und dabei nach drei Monaten auch angestiegen waren.

Die Bruchbilder der Körper mit HGJ - mit oder ohne Deckmörtel - setzten sich aus ca. 60 % Adhäsionsbruch, 30 % Kohäsionsbruch im Mörtel und 10 % Kohäsionsbruch im Stein zusammen. Bei Verwendung des Deckmörtels Si war der Adhäsionsbruchanteil deutlich höher, dafür betrug der Kohäsionsbruch im Mörtel nur bis zu 15 %. Bei den Vier-Stein-Körpern mit HGQ trat fast ausschließlich Adhäsionsbruch auf mit geringen Anteilen von Kohäsionsbruch im Mörtel bzw. im Stein.

Der Zustand der Drei-Stein-Körper wurde nach ihrem Rißbild beurteilt. Die Drei-Stein-Körper mit HGJ zeigten ohne Deckmörtel und mit dem Deckmörtel Si Flankenrisse, die aber nur sehr fein waren, ca. 0,1 mm breit, und auch nur geringe Tiefen erreichten. Querrisse traten bei diesen Drei-Stein-Körpern ebenfalls auf, aber lediglich 2 bis 4 Querrisse pro Fuge. Die Drei-Stein-Körper mit HGJ und Deckmörtel Re zeigten dagegen im Laufe der gesamten Auslagerungszeit keinerlei Flanken- oder Querrisse. Das Rißbild der Körper mit HGQ zeigte mit oder ohne Deckmörtel nach vier Wochen bereits Flankenrisse, die sich im Laufe der Wochen bis zu mehreren Zentimetern vertieften und oft die gesamte Fugenbreite von 30 cm erreichten. Es bildeten sich auch schon nach kurzer Zeit Querrisse, deren Öffnung bis zu 2 mm breit wurden.

Die Drei-Stein-Körper mit HGJ erreichten auf der Meßstrecke vertikal über der Fuge bis zu + 90 mm/m. Bei Verwendung des Deckmörtels Re waren die Maximalwerte etwas niedriger. Horizontal auf der Fuge wurden dagegen nur bis - 20 mm/m bzw. auf anderen Meßstrecken bis + 30 mm/m gemessen. An den Drei-Stein-Körpern mit HGQ wurden sehr große Verformungen gemessen. An den vertikalen Meßstrecken mit dem Deckmörtel Si wurden von Anfang der Auslagerung an stetig anwachsende Dehnungen ϵ ermittelt, die sich in der vierten Auslagerungswoche bei rund + 600 bzw. + 1200 mm/m einpendelten. Bis zum Zeitpunkt des Abbaus stiegen die

Dehnungen nicht weiter an. Die horizontalen Meßstrecken auf der Fuge zeigten bei einem Flankenabriß ein langsam zunehmendes Verkürzen, das bis zum Abbau - 60 mm/m erreichte. Wenn sich dagegen in den Meßstrecken Querrisse gebildet hatten, dann traten innerhalb kurzer Zeit zunehmende Dehnungen bis + 180 mm/m auf, die auf diesem Niveau blieben.

Nach einer einjährigen Auslagerungszeit ließ sich feststellen, daß der HGJ-Fugenstopfmörtel in Kombination mit dem Deckmörtel Re einen hervorragenden Verbund zum Harzer Dolomit aufweist. Es wurden keinerlei Risse im Mörtel beobachtet, obwohl Dehnungen und Stauchungen des Mörtels in der Fuge in Abhängigkeit von den klimatischen Bedingungen auftraten. Aus diesem Grund wurde die Auslagerungszeit der Körper mit HGJ ohne Deckmörtel und mit dem Deckmörtel Re verlängert, um Langzeitmessungen zu ermöglichen. Die Haftzugfestigkeit der abgebauten HGJ-Drei-Stein-Körper mit Deckmörtel Si lag dabei im Mittel bei $\beta_{HZ} = 0,14 \text{ N/mm}^2$. Die Ursache ist in den feinen Flankenabrissen zu sehen.

Der HGQ-Fugenstopfmörtel ist in seinen Quelleigenschaften offensichtlich überdimensioniert für die Anwendung im Verfugbereich: es bildeten sich schon in den ersten Wochen nach Herstellung Querrisse und Flankenabrisse, die sich teilweise bis zu einem völligen Abriß ausbreiteten. Deshalb wurden sämtliche Prüfkörper mit HGQ abgebaut und geprüft. Dabei wurden für die Haftzugfestigkeit die in Tabelle 3.11 gezeigten Mittelwerte erreicht, die die niedrigen Werte der Haftzugfestigkeit der Vier-Stein-Körper bestätigen.

Tab. 3.11: HGQ-Drei-Stein-Körper, Serie 2, Haftzugfestigkeit

HGQ	Haftzugfestigkeit $\beta_{HZ} [\text{N/mm}^2]$
ohne Deckmörtel	0,20
Deckmörtel Re	0,09
Deckmörtel Si	0,05

4 Musterkonsolidierung

Die Eignung des modifizierten Fugenstopfmörtel HGJ für die Neuverfugung der St. Johannis Kirche kann nur am Objekt verifiziert werden. Im Sommer 1994 wurde daher an der Kirche eine Musterverfugung durchgeführt, für die HGJ mit dem Deckmörtel Re verwendet wurde. Mit dem Ausräumen und Verfugen wurde die Firma Preßbau GmbH beauftragt, die für objektbezogene Arbeiten Fachkräfte aus dem Handwerk zur Verfügung stellen kann. An einer Musterfläche soll vor allen Dingen die Applikationstechnik am Bauwerk erprobt werden. Der Faserstopfmörtel wurde zwar erstmalig an einem Pilotobjekt eingesetzt, aber bereits 1992 wurde in Walkenried am Wirtschaftsgebäude des Klosters eine Musterfläche mit HGZ unter Leitung der MPA Braunschweig verfugt. Damals allerdings noch händisch. Die in Ellrich angewandte Technik sollte vor allem auch auf die Praktikierbarkeit des Fugenstopfens ausgerichtet sein.

4.1 Auswahl der Musterfläche

Die Fläche am Objekt, die einer Musterkonsolidierung durch Neuverfugung unterzogen wird, sollte repräsentativ für das Bauwerk sein. Die für die Verfugung relevanten Kriterien sind die Geometrie der Fugen und der Zustand des Altmörtels. Hinsichtlich der Geometrie sollten in der Musterfläche Preßfugen und normale Fugen auftreten. Der Zustand des Altmörtels reicht von oberflächlich ausgewitterten Fugen bis zu tiefen Hohlfugen.

Die Fläche im Giebel des nördlichen Querhauses entspricht diesem Bild. Die Geometrie der Fugen ist in der Abbildung 4.1 zu erkennen. Wie man sehen kann, gibt es viele Preßfugen, aber auch stärkere Fugen. Die Fugengeometrie wird im Detail A vergrößert dargestellt, das Detail B stellt die Ausräum-, Fugenstopf- und Deckmörteltiefen für diesen Ausschnitt vergrößert dar (Abb. A.1 und A.2 im Anhang).

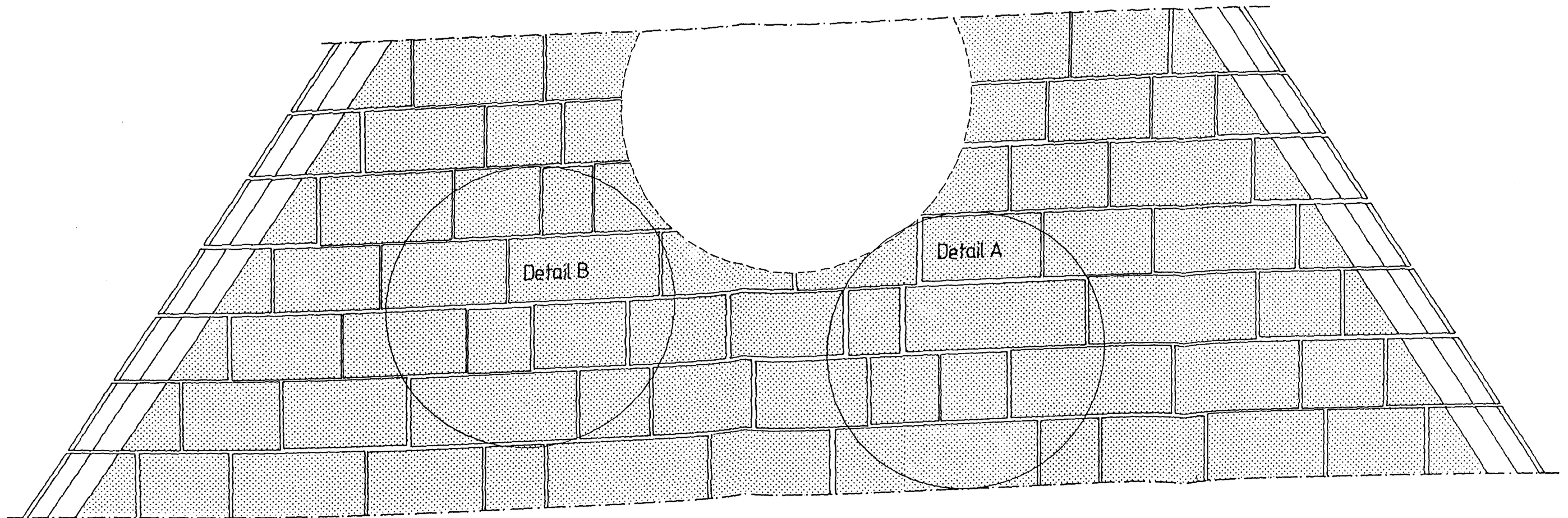


Abb. 4.1: Geometrie der Fugen in der Musterfläche, Maßstab 1:20

4.2 Ablauf der Verfugung

Vor dem Einbringen des Verfugmörtels mußten die Fugen von dem lockeren Mörtel befreit werden. In jeder Lager- oder Stoßfuge wurden mindestens die äußeren 2 cm ausgeräumt, um den Deckmörtel einbringen zu können. Das Gesamtbild der Musterfläche sollte einheitlich sein.

Die Art der Ausräumtechnik wurde eingehend diskutiert. Das heute häufige Wasserstrahlverfahren wurde nicht angewandt, da der Feuchteeintrag für den Gipsaltmörtel im Mauerwerk zu hoch wäre. Das händische Ausräumen mit dem Meißel konnte wegen der geringen Höhe der Preßfugen nicht durchgeführt werden. So wurden die Fugen mit der Trennscheibe ausgeräumt (Abb. 4.2). Mörtelreste wurden anschließend weggefegt und der entstandene Staub mit Preßluft aus den Fugen ausgeblasen. Nach dem Ausräumen wurde die Fugentiefe wieder kartiert (Abb. 4.3). So konnte genau festgehalten werden, wie tief der Fugenstopfmörtel eingebracht wurde.



Abb. 4.2: Ausräumen der Fugen mit der Trennscheibe

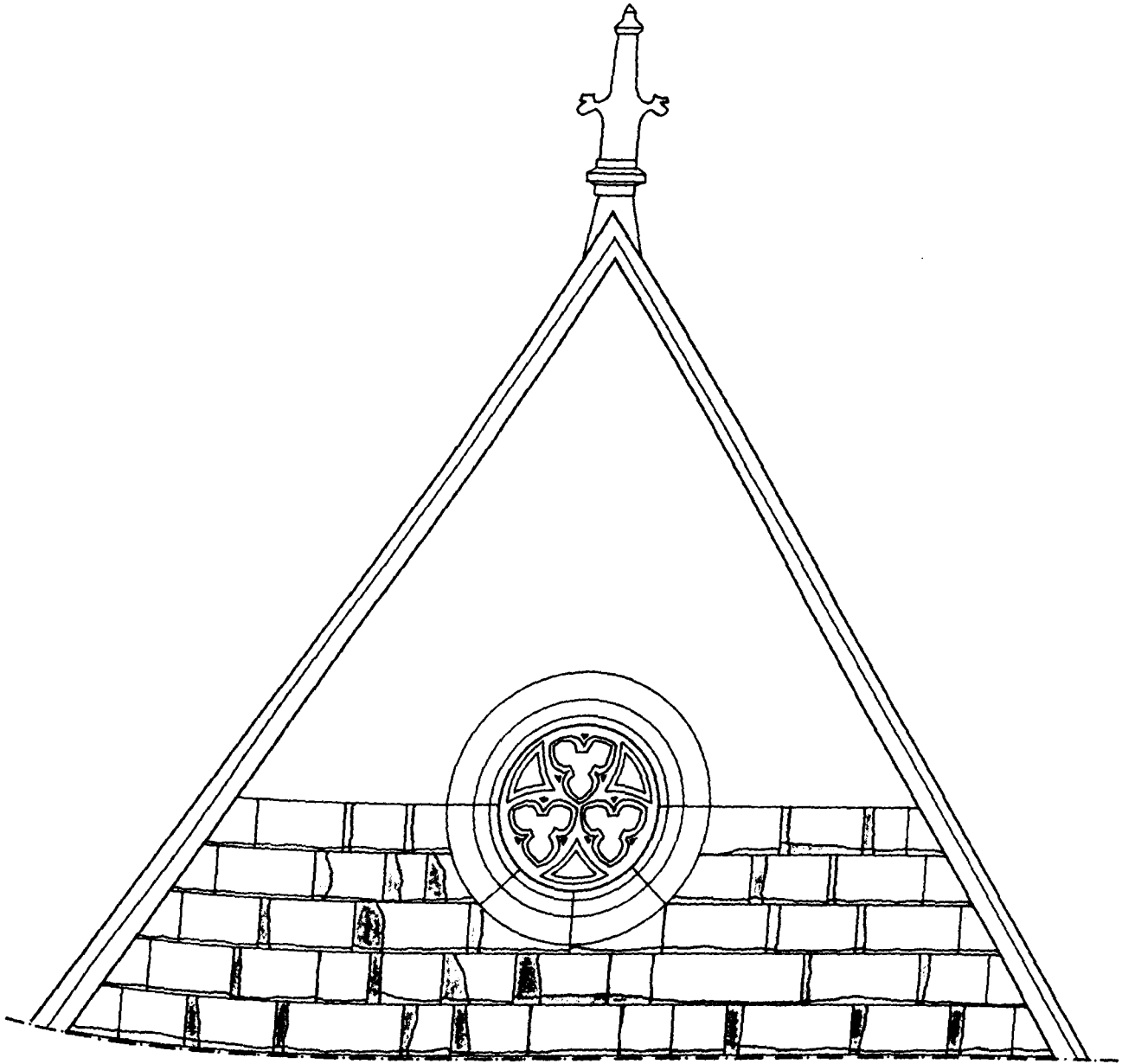


Abb. 4.3: Fugentiefen nach dem Ausräumen, Maßstab 1:40

In Abstimmung mit dem zuständigen Restaurator wurden keine Fugen ausgeräumt und gestopft, die in Berührung mit gestalterischen Elementen standen, z.B. das Rundfenster in der Mitte des Giebels. Die Ortsteine des Giebels wurden ebenfalls nicht neuverfugt, da befürchtet wurde, daß sie gelöst werden könnten.

Vor dem Einstopfen des HGJ-Mörtels wurden die Fugen vorgenäßt, damit der Dolomitstein dem Mörtel in der Erhärtungsphase kein Wasser entzieht. Da der Dolomit eine geringe Wasseraufnahme aufweist, mußten die Steinflanken nur kurze Zeit genäßt werden.

Der Mörtel wurde chargenweise im Zwangsmischer angemischt und war dann für ca. eine Stunde verarbeitbar. Abbildung 4.4 zeigt das Einbringen des Faserstopfmörtels mit dem Fugeisen und Abbildung 4.5 das anschließende Verdichten mit einem Preßluft betriebenen Bildhauerhammer. Der stumpfe Meißel aus Hartkunststoff sitzt locker in einem Aufsatz des Hammers und wird mit einer Hand geführt, während die andere den Hammer hält und den Antrieb bedient. Die Amplitude der Schwingungen ist sehr niedrig, es werden keinerlei Stöße auf das Mauerwerk übertragen.

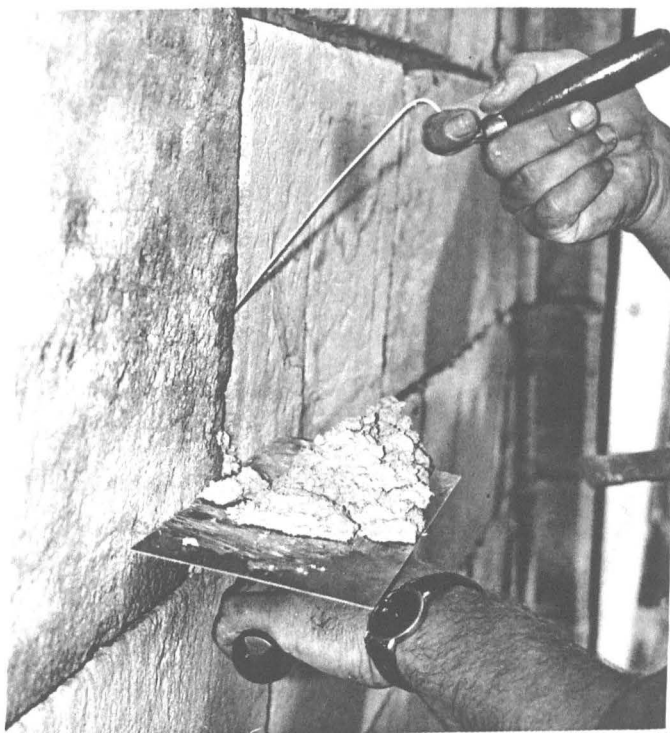


Abb. 4.4: Einbringen des Stopfmörtels mit dem Fugeisen



Abb. 4.5: Verdichten des Stopfmörtels mit dem Bildhauerhammer

Der Stopfmörtel wurde so in die Fugen eingebracht, daß die äußeren 1,5 bis 2 cm der Fuge für den Deckmörtel frei blieben. Aber nicht überall reichte die Fugentiefe nach dem Ausräumen oder auch die Fugenbreite - Preßfugen - aus, um überhaupt Faserstopfmörtel einzubringen. Daher wurde in Abbildung 4.6 mit der blauen Markierung festgehalten, wo Mörtel eingestopft wurde. In den nicht markierten Bereichen wurde also nur mit dem Deckmörtel Re verfugt. Es fällt auf, daß die linke Hälfte der Musterfläche weniger gestopfte Fugen aufweist als die rechte Hälfte. Das ist damit zu erklären, daß die linke Hälfte mehr Preßfugen und weniger tief ausgeräumte Fugen aufweist.

Der Deckmörtel wurde einen Tag nach dem Einstopfen des Fasermörtels aufgebracht, da der Fasermörtel eine hohe Hydratationswärme abgibt, die das Haften des Deckmörtels am Fasermörtel verhindern würde. Die Musterfläche wurde bis dahin sorgfältig mit befeuchteten Jutebahnen und Folie abgehängt, um ein Austrocknen zu vermeiden. Die Steinflanken wurden wieder kurz vorgeenäßt, dann wurde der Deckmörtel mit dem Fugeisen aufgetragen (Abb. 4.7).

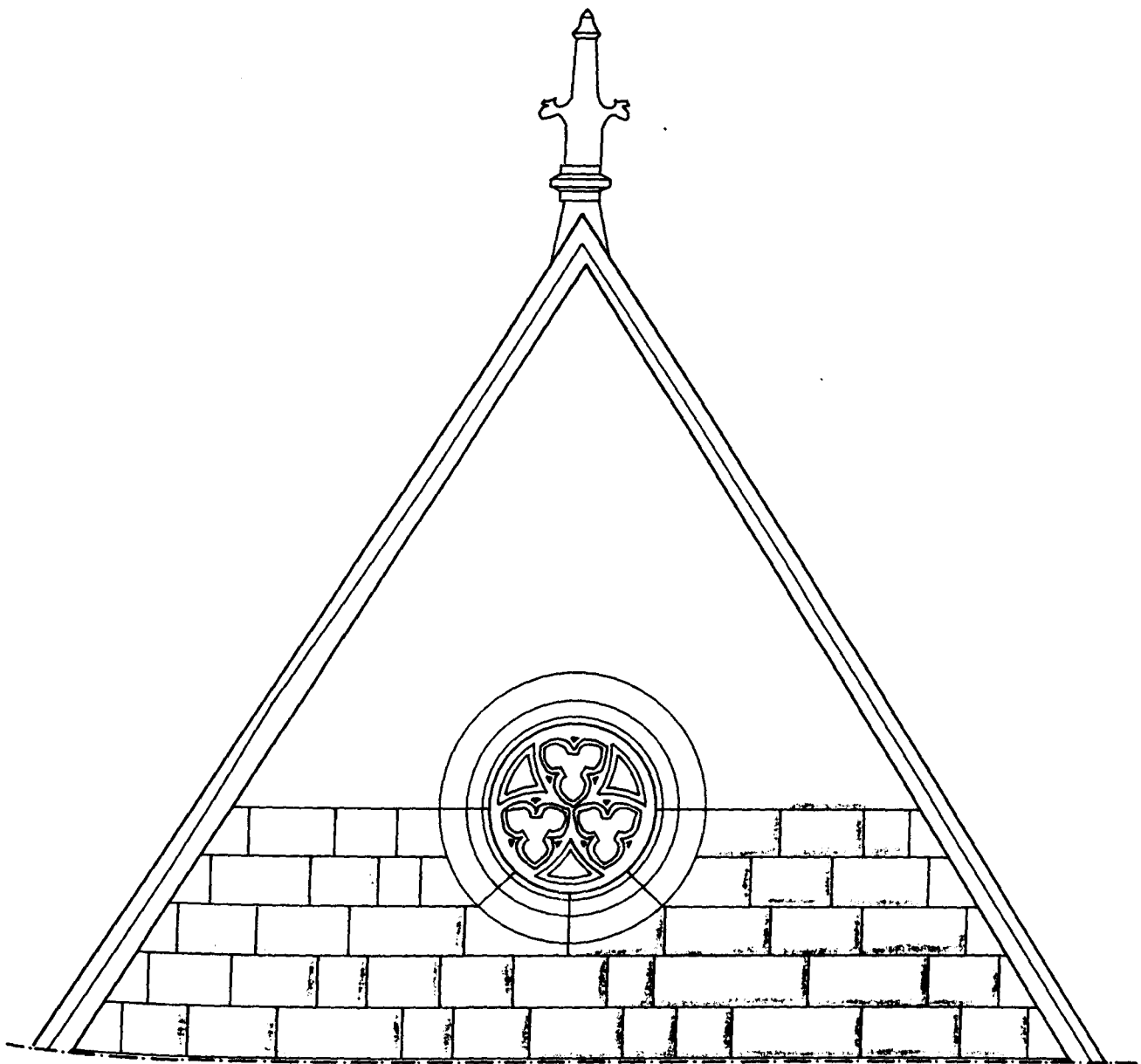


Abb. 4.6: Fugen mit Faserstopfmörtel, Maßstab 1:40



Abb. 4.7: Auftragen des Deckmörtels

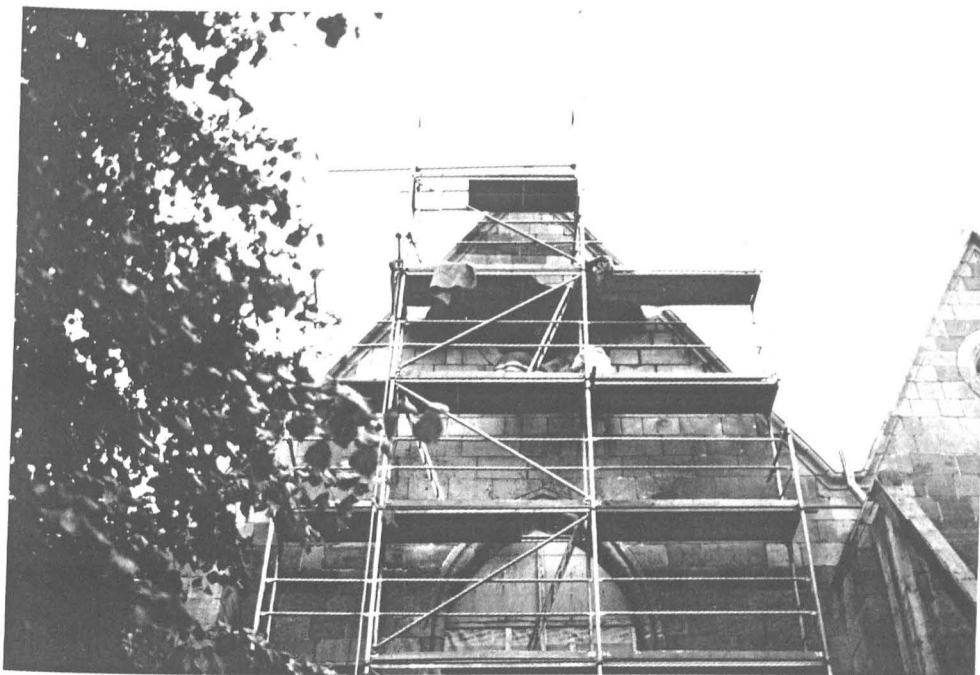


Abb. 4.8: Gesamtbild der eingerüsteten Musterachse

Der Deckmörtel wurde nur leicht mit dem Fugeisen angedrückt und geglättet. Die Konsistenz wurde verfuggerecht eingestellt.

Abschließend wurde die gesamte Fläche, wie auf Abbildung 4.8 zu erkennen ist, wieder abgehängt. Zwei Wochen lang wurden die vorgehängten Jutebahnen feucht gehalten, um das Hydratisieren unbefußt von Wind und Austrocknung zu ermöglichen. Nach Beendigung der Nachbehandlungsphase konnten induktive Wegaufnehmer instrumentiert werden, um den Schritt vom Bewitterungsprüfkörper zum Objekt auch auf diesem Weg nachzuvollziehen (Abb. 4.9). Die Klimadaten wurden fortlaufend aufgenommen.

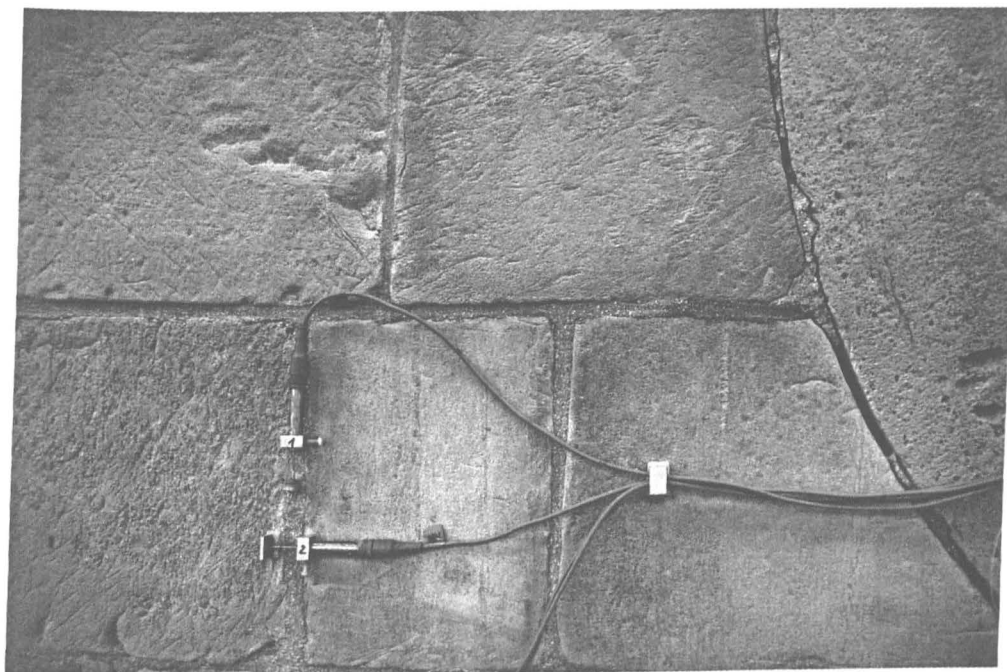


Abb. 4.9: Induktive Wegaufnehmer auf den Fugen

4.3 Beurteilung der Verfugung

Das Anlegen der Musterfläche verlief schnell und ohne größere Probleme. Die Fläche, die in zwei Abschnitten bearbeitet wurde, war innerhalb von 2 Tagen ausgeräumt, mit Fasermörtel gestopft und mit Deckmörtel neu verfugt, sowie mehrmals kartiert worden.

Zwei Personen waren ca. 1 Stunde mit dem Stopfen einer Hälfte der Fläche beschäftigt, das Auftragen des Deckmörtels dauerte pro Abschnitt ca. eine halbe Stunde. Das Ausräumen eines Abschnittes der Musterfläche ist mit etwa einer Stunde einzurechnen. Eine weitere Person bediente den Mischer, traf Vorbereitungen und kartierte.

Der Ablauf läßt sich noch rationalisieren. So können ohne weiteres größere Wandabschnitte pro Tag ausgeräumt und verfugt werden und die Verarbeitungszeit des Mörtels läßt sich sicher verlängern. Es hat sich aber gezeigt, daß der Faserstopfmörtel praktikabel für die Neuverfugung eines Natursteinmauerwerks ist und eine sinnvolle Alternative zu den übrigen marktgängigen Mörteln darstellt.

5 Schlußbetrachtung

Die Musterfläche wurde nach Beendigung der Nachbehandlung eingehend hinsichtlich einer etwaigen Rißbildung überprüft. Es waren zu diesem Zeitpunkt und auch bis heute keine Flankenrisse oder Querrisse zu erkennen. Nach knapp einem halben Jahr, Ende Januar 1995 wurde die Fläche dann mittels Hebebühne betrachtet, wobei ebenfalls noch keine Risse entdeckt wurden. Abbildung 5.1 zeigt ein Gesamtbild der Fläche, die Abbildung 5.2 einen Ausschnitt.



Abb. 5.1: Gesamtansicht der Musterfläche, Ende Januar 1995

Zu diesem Zeitpunkt waren schon der Herbst und zwei sehr kalte und niederschlagsreiche Wintermonate vorübergegangen. Der Haftverbund wurde dadurch aber nicht in Mitleidenschaft gezogen, so daß sich allen nach Erfahrungen mit den Bewitterungsprüfkörpern die vorsichtige Prognose treffen läßt, daß der Zeitraum, in dem Risse durch hätte eintreten können, vorbei ist. Das ist sicherlich keine Gewähr dafür, daß die Verfugung nicht irgendwann Schaden annehmen könnte, doch eine relativ hohe Lebensdauer kann erwartet werden.

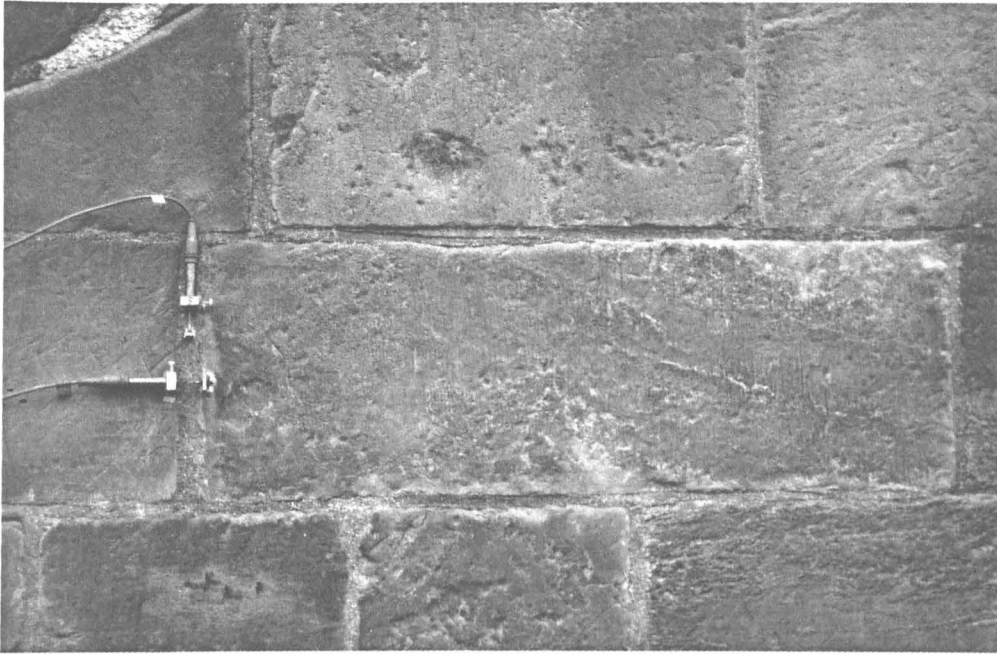


Abb. 5.2: Ausschnitt der Musterfläche, Ende Januar 1995

6 Literatur

- /1/ Knöfel, D.; Schubert, P.: Handbuch Mörtel und Steinergänzungsstoffe in der Denkmalpflege, Verlag Ernst & Sohn, 1993.
- /2/ Lucas, H. G.: Gips als historischer Außenbaustoff in der Windsheimer Bucht - Verbreitung, Gewinnung und Beständigkeit im Vergleich zu anderen örtlichen Naturwerksteinen, Dissertation RWTH Aachen 1992.
- /3/ Sattler, H.: HGZ-Fasermörtel für die Fugensanierung - Anwendungsvorteile und -grenzen, Bauwirtschaftliche Informationen, November 1993.
- /4/ Polster, H.; Hoffmann, D.: Untersuchungsbericht Nr. 06.93 zu Ergebnissen der Verträglichkeitsuntersuchungen an Hütensand-Gips-Bindemittelsystemen, IEMB Berlin, Februar 1993.
- /5/ Weiß, D.; Rostásy, F.S.: Untersuchungen zum Verbundverhalten zwischen HGZ-Faserstopfmörteln und Natursteinen, Forschungsbericht an der MPA Braunschweig, 1992.
- /6/ Piepenburg, W.: Mörtel, Mauerwerk, Putz, Bauverlag Wiesbaden 1969.
- /7/ Thür. Landesamt für Denkmalpflege: Projektskizze für Forschung und Entwicklung im Rahmen der vom BMFT geförderten Denkmalpflege-Forschung - Pilotobjekt St. Johanniskirche, Teil 1, Fulda November 1992.
- /8/ Burkhardt, B.: Dokumentation und Maßnahmenkatalog zur Erhaltung und Wiederherstellung der St. Johannis Kirche in Ellrich - Entwurf, TU Braunschweig in Zusammenarbeit mit dem Förderkreis zum Wiederaufbau der St. Johannis Kirche in Ellrich e.V., Braunschweig April 1991.
- /9/ Polster, H.; Hoffmann, D.: Untersuchungsbericht Nr. 06.93 zu Ergebnissen der Verträglichkeitsuntersuchungen an Hütensand-Gips-Bindemittelsystemen, IEMB Berlin, Februar 1993.
- /10/ Sattler, H.: Eignung von Lignocellulosefasern als Asbestersatz; Bausanierung Heft 3 - 1993.
- /11/ Warscheid, T.: Zwischenbericht zu den mikrobiologischen Untersuchungen an HGZ-Fasermörteln, unveröffentlicht, Labor Bode-Warsched, 1994.
- /12/ Budelmann, H.; Weiß, D.; Rostásy, F.S.: Der Verbund zwischen Fugenmörtel und Naturstein - Anforderungen und Prüfung, In: Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Teil 2, Expert Verlag, 1993.

- /13/ Thole, V.: Faserstopfmörtel zur Bauwerkssanierung - Herstellung und Eigenschaften von Mörtel mit Cellulosefasern (Teil 1), In: Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Teil 2, Expert Verlag, 1993.
- /14/ DIN 18555, Teil 6: Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln - Festmörtel - Bestimmung der Haftzugfestigkeit, November 1987.
- /15/ Erbaydar, S.: Faserstopfmörtel zur Bausanierung - Sulfatisch/basisch angeregte quellfähige Mörtelsysteme mit Cellulosefasern; In: Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Teil 2, Expert Verlag, 1993.
- /16/ Weiß, D.: Haftzugfestigkeit zwischen Harzer Dolomit und modifizierten LCF-Stopfmörteln, unveröffentl. Bericht an der MPA Braunschweig, Januar 1993.
- /17/ Grimm, W.-D.: Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland, Karl M. Lipp Verlag, München 1990.
- /18/ Müller, F.: Gesteinskunde, Erber Verlag, Ulm 1984.
- /19/ Reinsch, D.: Natursteinkunde, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart 1991.
- /20/ DIN 52103: Prüfung von Naturstein und Gesteinskörnungen - Bestimmung von Wasseraufnahme und Sättigungswert, Oktober 1988.
- /21/ DIN 52105: Prüfung von Naturstein - Druckversuch, August 1988.
- /22/ DIN 52112: Prüfung von Naturstein - Biegeversuch, August 1988.
- /23/ Untersuchungsbericht Nr. 4095/2021: Chemisch-mineralogische Untersuchungen an Mörtel und Mauersteinen der Kirche St. Johannis, MPA Braunschweig, 22.04.1992.
- /24/ 1. Zwischenbericht zu Untersuchungen an der St. Johannis-kirche in Ellrich, Bericht Nr. 8023/8424-1, MPA Braunschweig, März 1994.
- /25/ Autorenkollektiv: Der Baustoff Gips, Stoffliche Grundlagen, Herstellung und Anwendung von Gipsbauelementen, Institut für Baustoffe der Bauakademie der DDR, Berlin, 1978.
- /26/ 1. Orientierungsuntersuchung an der St. Johannis Kirche in Ellrich vom 17.02.-19.02.1992, MPA Bremen, Februar 1992.
- /27/ Bericht über die Baugrund- und Gründungsverhältnisse für den Wiederaufbau der St. Johanniskirche in Ellrich, Nr. G:01-92, GUD Ingenieurbüro, Leipzig, Januar 1992.

- /28/ Erbaydar S.: Rezepturoptimierung und -modifizierung von "sulfatisch/basisch angeregten Bindemittelsystemen" mit und ohne Zusätzen, Teile 1 - 8, WKI-Berichte, Fraunhofer Gesellschaft für Holzforschung WKI Braunschweig, 1992.
- /29/ Erbaydar, S.: Hydratation des Hüttensandes im HGZ, WKI-interner Bericht, Fraunhofer Gesellschaft für Holzforschung WKI Braunschweig, Mai 1991.
- /30/ Erbaydar, S.: Einfluß von abbindesteuernden Zusatzmitteln auf die HGZ-Hydratation sowie Untersuchungen über alternative Bindemittelsysteme auf der Basis von Hüttensand-Tonerdezement bzw. Hüttensand-Schnellzement, WKI-interner Bericht, Fraunhofer Gesellschaft für Holzforschung WKI Braunschweig, Februar 1992.
- /31/ Prospekte und Sicherheitsdatenblatt der Firma Remmers 1994.
- /32/ DIN EN 196, Teil 1: Prüfverfahren für Zement - Bestimmung der Festigkeit, März 1990.
- /33/ Rinne, A.; Warnecke, P.; Rostásy, F.S.: Zur Dauerhaftigkeit von Verfugungen unter thermisch-hygrischer Einwirkung, In: Wiss. Zeitschrift der HAB Weimar, Heft 5/6/7/1994, anläßlich der 12. Int. Baustofftagung ibausil in Weimar, September 1994.

Anhang

Tab. A.1: Chemische Zusammensetzung von HGZ-Bindemitteln

Analyse	HGZ	
Glühverlust 1000°C	0,54	Lösliches, glühverlust- frei Gew.-%
davon CO ₂	0,23	
Salzsäureunlösliches	0,40	
lösliche Kieselsäure SiO ₂	30,95	31,24
Eisen Fe ₂ O ₃	1,19	1,20
Aluminium Al ₂ O ₃	9,38	9,47
Titan TiO ₂	n.b.	n.b.
Calcium CaO	42,05	42,45
Magnesium MgO	7,84	7,91
Natrium Na ₂ O	0,35	0,35
Kalium K ₂ O	0,60	0,61
Sulfat SO ₃	6,07	6,13
Rest	0,63	0,64
Summe ohne CO ₂	100,00	100,00

Tab. A.2: Chemische Zusammensetzung von HGJ-Bindemitteln

Analyse	HGJ	
Glühverlust 1000°C	0,64	Lösliches, glühverlust- frei Gew.-%
davon CO ₂	0,24	
Salzsäureunlösliches	0,49	
lösliche Kieselsäure SiO ₂	32,92	33,30
Eisen Fe ₂ O ₃	1,03	1,04
Aluminium Al ₂ O ₃	10,08	10,19
Titan TiO ₂	n.b.	n.b.
Calcium CaO	42,04	42,52
Magnesium MgO	7,76	7,85
Natrium Na ₂ O	0,39	0,39
Kalium K ₂ O	0,61	0,62
Sulfat SO ₃	3,50	3,54
Rest	0,54	0,55
Summe ohne CO ₂	100,00	100,00

Tab. A.3: Chemische Analyse von HGQ-Bindemitteln

Analyse	HGQ	
Glühverlust 1000°C	0,84	Lösliches, glühverlust- frei Gew.-%
davon CO ₂	0,28	
Salzsäureunlösliches	0,63	
lösliche Kieselsäure SiO ₂	30,31	30,76
Eisen Fe ₂ O ₃	0,94	0,95
Aluminium Al ₂ O ₃	10,01	10,16
Titan TiO ₂	n.b.	n.b.
Calcium CaO	41,44	42,06
Magnesium MgO	7,67	7,78
Natrium Na ₂ O	0,34	0,35
Kalium K ₂ O	0,56	0,57
Sulfat SO ₃	7,26	7,37
Rest	--	--
Summe ohne CO ₂	100,00	100,00

Tab. A.4: Chemische Zusammensetzung von Re-Bindemitteln

Analyse	Remmers Sanierputz	
Glühverlust 1000°C	4,77	Lösliches, glühverlust- frei Gew.-%
davon CO ₂	0,53	
Salzsäureunlösliches	45,25	
lösliche Kieselsäure SiO ₂	10,25	20,51
Eisen Fe ₂ O ₃	2,18	4,36
Aluminium Al ₂ O ₃	7,52	15,05
Titan TiO ₂	n.b.	n.b.
Calcium CaO	20,63	41,28
Magnesium MgO	0,94	1,88
Natrium Na ₂ O	5,11	10,22
Kalium K ₂ O	2,81	5,62
Sulfat SO ₃	0,54	1,08
Rest	--	--
Summe ohne CO ₂	100,00	100,00

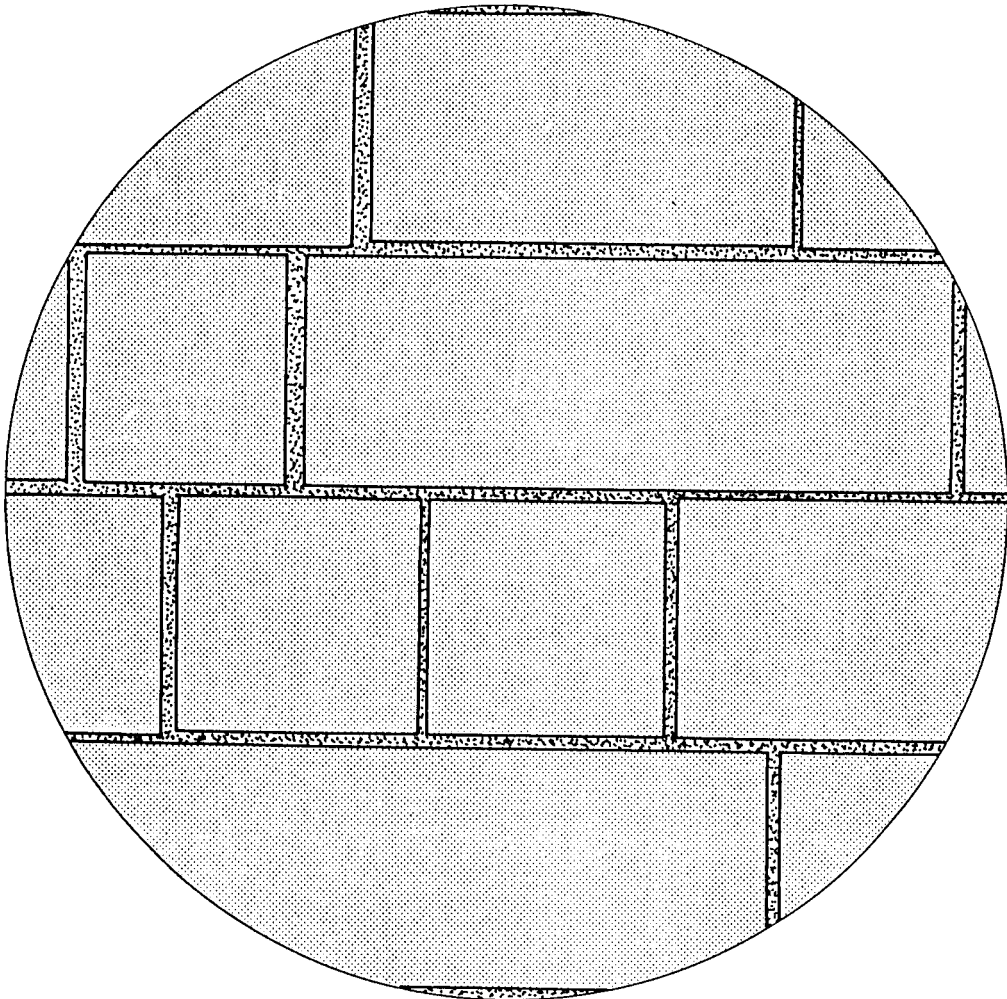


Abb. A.1: Detail A der Musterfläche: Fugengeometrie (1:10)

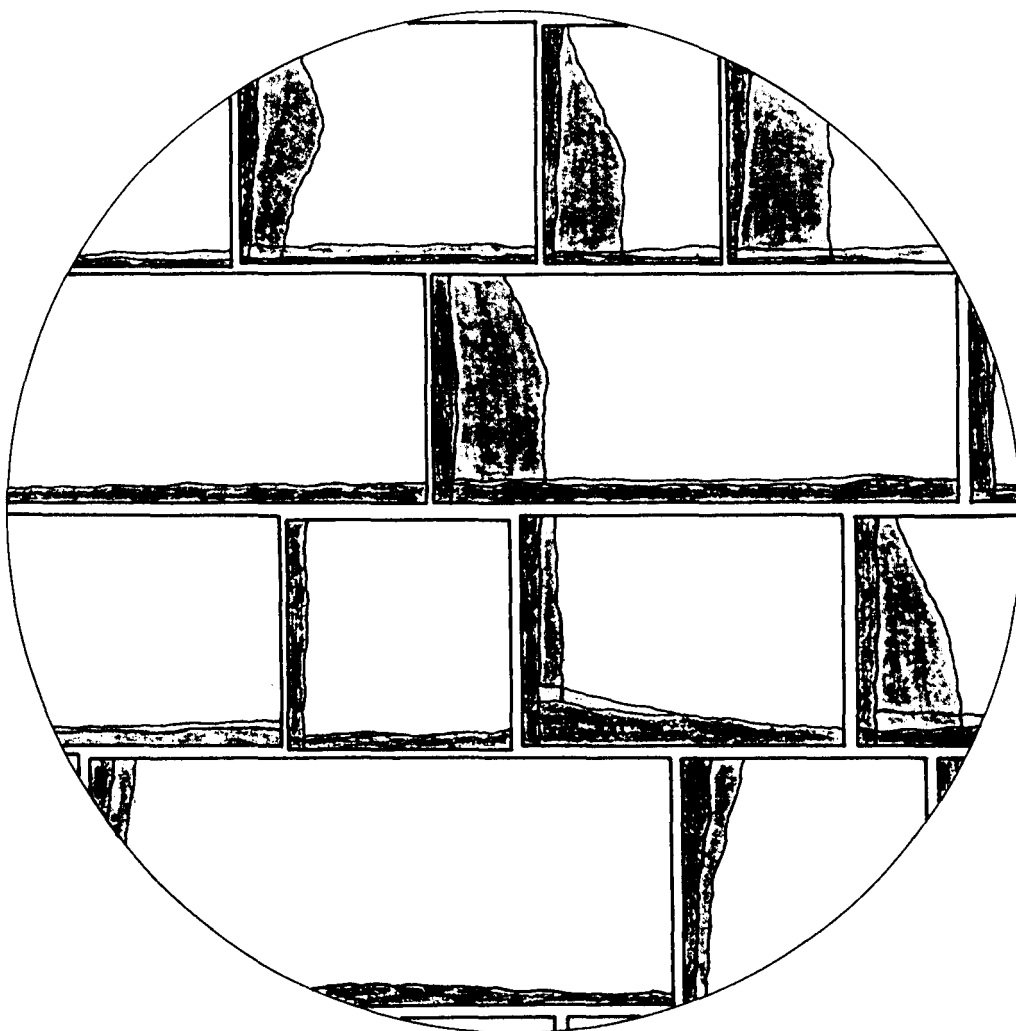


Abb. A.2: Detail B der Musterfläche (1:10): Ausräum-,
Stopfmörtel- (grün) und Deckmörteltiefen (braun)